8 ELETRÔNICA RÁDIO E TV

SUMÁRIO

INSTITUTO UNIVERSAL BRASILEIRO

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO-TV

8ª LIÇÃO TEÓRICA

RETIFICAÇÃO DE CA

Introdução

A energia elétrica tem inúmeras aplicações. Pode ser usada para produzir calor e luz, movimentar motores, etc. As fontes de energia são diversas, como sabemos, sendo as mais comuns os geradores de corrente contínua (dínamos, pilhas e baterias), os geradores de corrente alternada (alternadores).

As pilhas, dínamos e baterias fornecem corrente contínua, e os alternadores fornecem corrente alternada. Este último tipo de gerador é que fornece energia para a maioria das cidades e para o campo, onde chega a eletrificação rural. Quando se trata de produzir luz, calor ou movimentar motores, é indiferente que a tensão seja contínua ou alternada; mas quando devemos alimentar aparelhos eletrônicos, que funcionam à base de transistores ou circuitos integrados, necessita-se de corrente contínua. Se a rede de nossa casa é de corrente alternada, podemos utilizar pilhas ou baterias para fazer funcionar os aparelhos eletrônicos, mas isso nem sempre é possível, por algumas razões, principalmente a econômica, porque a energia de pilhas e de baterias é muito mais cara que a energia fornecida pela empresa de luz e força, e ainda porque é mais difícil de se conseguirem altas voltagens pelo uso de pilhas e de baterias. Em circuitos utilizando transistores, é cômodo alimentar os aparelhos de pequena potência com pilhas, mas seria impossível alimentarmos um amplificador de som de 20 ou mais watts, por exemplo, com pilhas. Por esses motivos, emprega-se a corrente alternada domiciliar, previamente convertida em corrente contínua pelo uso de um **circuito retificador**.

I - Retificadores de corrente alternada

A retificação da corrente alternada, ou seja, a sua transformação em corrente contínua, é conseguida pelo emprego de elementos semicondutores como os retificadores de estado sólido, principalmente os diodos de silício.

1 - O diodo semicondutor como retificador

Uma das principais aplicações práticas do diodo é a do processo de retificação, pelo qual uma tensão alternada com valor médio zero, como representado na **figura 1,** é convertida em uma tensão com valor médio ou nível DC (componente contínua) maior que zero.
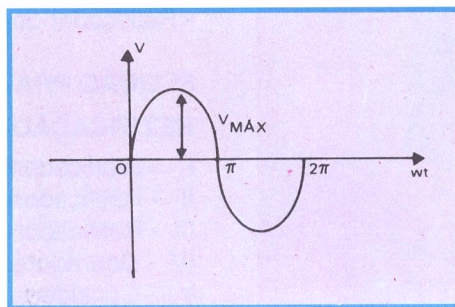
Figura 1 - Gráfico - tensão alternada.

O circuito necessário é mostrado na **figura 2**, com um diodo ideal (circuito aberto na região de não condução, isto é, a corrente no diodo é nula).
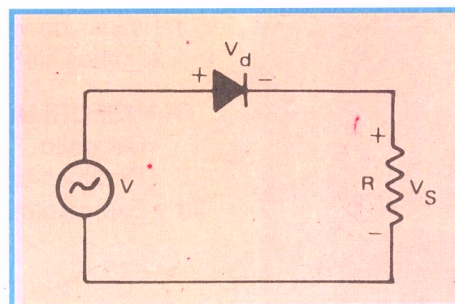
Figura 2 - Circuito retificador.

Para a tensão senoidal de entrada V definida no intervalo de 0 a π, como demonstrado na **figura 3**, a polaridade da tensão nos terminais do diodo é tal que resulta uma representação de curto-circuito (vd = 0 V), conforme mostra a **figura 4**, pois o seu ânodo encontra-se em um potencial positivo, em relação ao seu cátodo, o que equivale a dizer que o componente encontra-se corretamente polarizado.
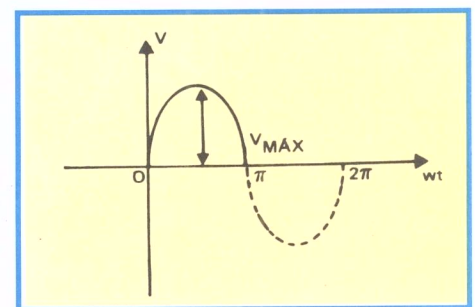
Figura 3 - Gráfico - semiciclo positivo.
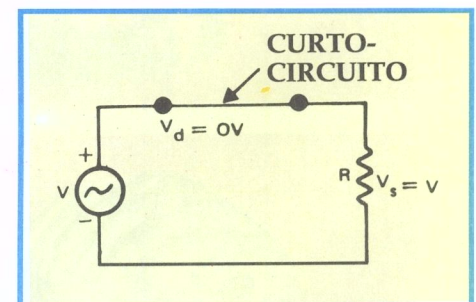
Figura 4 - Estado de condução.

Observação: dizemos que VD = 0 V, pois estamos considerando o diodo em questão como sendo um componente ideal e ignorando a barreira de potencial, existente no componente real.

Para a tensão senoidal de entrada V definida no intervalo de π a 2π como mostrado na **figura 5**, resulta a representação de circuito aberto,

conforme mostra a **figura 6**, pois o diodo encontra-se inversamente polarizado, já que o seu cátodo encontra-se neste instante, em um potencial mais positivo que seu ânodo.
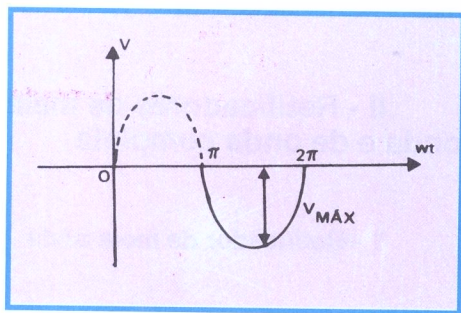
Figura 5 - Gráfico - semiciclo negativo.

Observe a polaridade da tensão de entrada V em cada circuito. Para a figura 4, a tensão de saída V_S será a mesma da tensão de entrada V, uma vez que o diodo está diretamente polarizado.
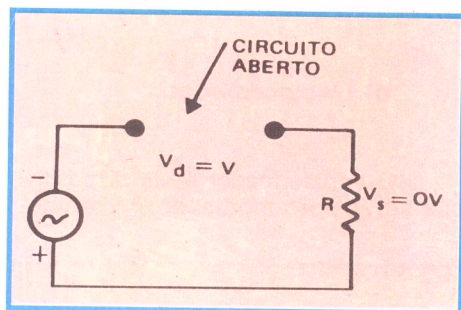
Figura 6 - Estado de não condução.

Na **figura 6**, devido as características de circuito aberto do diodo ideal, a tensão de saída V_S é igual a zero.

A forma de onda resultante na saída é mostrada na **figura 7**, **para um ciclo da tensão senoidal** de entrada V.
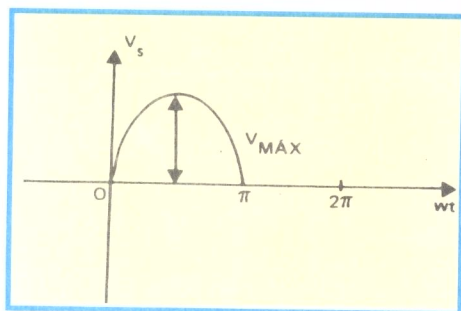
Figura 7 - Forma de onda obtida na carga.

2 - Filtros

Consideremos que, pelo resistor R de carga, passe corrente pulsante com forma de onda semelhante à que mostramos na figura 7. Coloquemos, em paralelo com o resistor, um capacitor de capacitância elevada. Teremos o circuito mostrado na **figura 8**. Então, acontece o
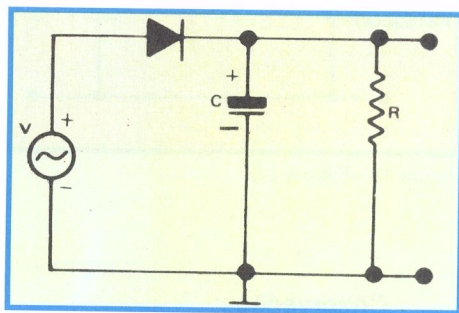
Figura 8 - Filtro RC.

seguinte: quando a corrente, no resistor, flui de A até o ponto O, que corresponde à amplitude máxima, o capacitor C carrega-se com sua máxima carga,conforme mostrados nas **figuras 9 e 10**, onde representamos a forma de onda obtida à saída do retificador sem a presença, no circuito, do capacitor C (figura 9) e com a presença do mesmo (figura 10). Quando a corrente decresce, o que corresponde ao trecho OB, o capacitor começa a descarregar-se, através do resistor R, e continua se descarregando durante o tempo em que o diodo não conduz. Como a descarga é lenta, o capacitor não chega a atingir carga zero, produzindo o trecho OX da figura 10. A corrente agora fica bem mais próxima da forma de corrente contínua. O circuito RC é chamado de **filtro RC**. Devemos esclarecer que a filtragem é tão mais eficiente quanto maior
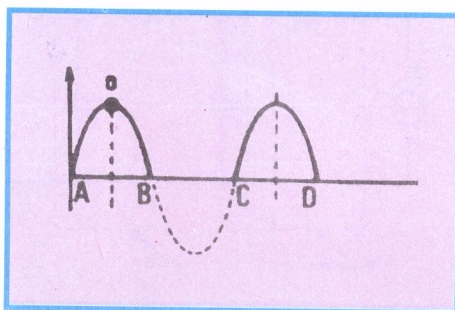
Figura 9 - Gráfico - tensão sem filtragem.
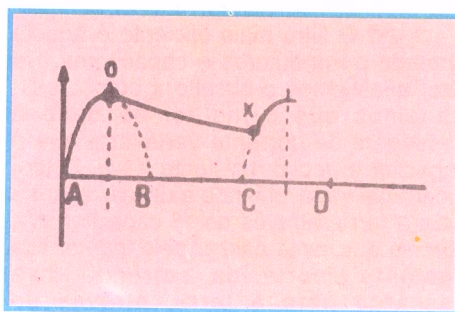
Figura 10 - Gráfico - tensão após filtragem.

é o produto RC, embora, na prática, esse produto tenha limitações.

O filtro RC é o mais elementar que existe, porém os filtros mais eficientes são constituídos de indutores e capacitores.

Tipos de filtros

De acordo com a disposição dos elementos de filtragem, podemos classificar os filtros em tipos L, T e π (pi).

Na **figura 11** mostramos um filtro RC do tipo L e, na **figura 12**, um filtro LC em L. Esses filtros também são chamados de L com capacitor na entrada, para diferenciar do L com capacitor na saída, que se obteria mudando a posição de R, L ou C, como mostramos nas **figuras 13** e **14.** Cabe aqui uma pequena observação: nos circuitos eletrônicos mais elementares, a resistência R, integrante do filtro RC em L (com o capacitor na entrada) é composta pela própria impedância apresentada pela carga.

Na **figura 15**, mostramos um filtro do tipo T, contendo resistor e capacitor e, na **figura 16**,o filtro em T, contendo indutor e capacitor.

Finalmente, apresentamos os filtros em π, sendo na **figura 17** o RC e na **figura 18** o LC. Esse tipo de filtro é um dos mais difundidos, na prática.
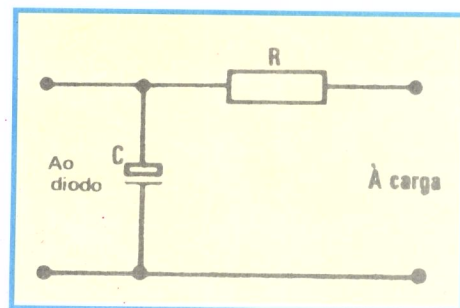
Figura 11 - Filtro L - RC.
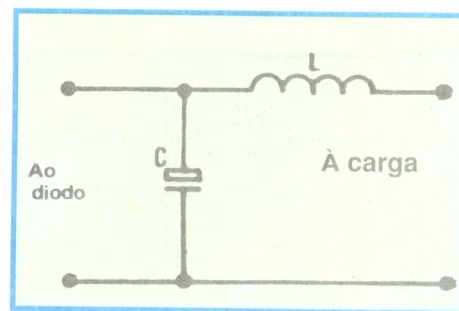
Figura 12 - Filtro L - LC.
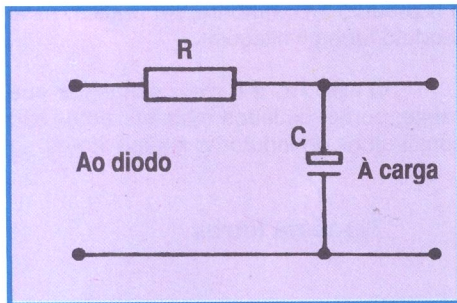
Figura 13 - Filtro L - RC (capacitor na saída).
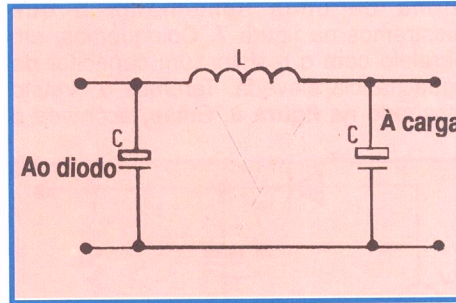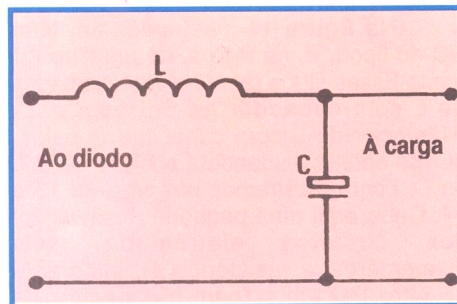
Figura 14 - Filtro L - LC (capacitor na saída).
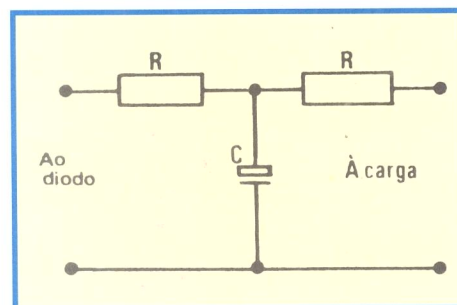
Figura 15 - Filtro T-RC.
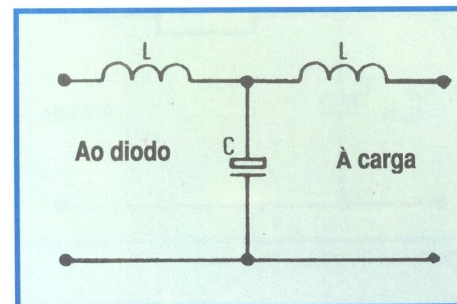
Figura 16 - Filtro T-LC.

Figura 17 - Filtro π - RC.

Figura 18 - Filtro π-LC.

Observações:

1ª) A carga que vai ligada aos terminais da rede de filtro constitui a resistência que oferecem (associados) os componentes que serão alimentados pelo retificador. Para ilustrar, na **figura 19**, mostramos como é ligado o retificador, o filtro π-RC e a carga, sendo esta última representada por uma série de transistores, dos mais usados em receptores de rádio. Em pontilhado, indicamos o retificador, que é composto pelo diodo 1N4002, o filtro em π, formado pelo resistor R e dois capacitores, e a carga que é imposta pela resistência do conjunto de transistores.
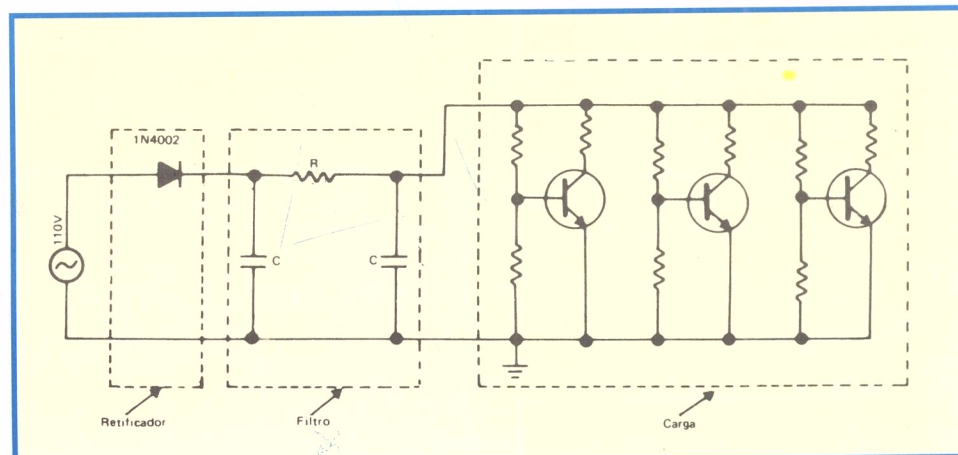
Figura 19 - Exemplo de carga.

2ª) O filtro mais eficiente é aquele formado por indutores e capacitores. De fato, analisemos o circuito π com L e C. Sabemos que o indutor se opõe à passagem de corrente variável e que o capacitor é pouco resistente a ela. Então, a corrente variável tende a descarregar-se para a terra, através do 1º capacitor, e a parcela que tenta passar pelo indutor fica bastante amortecida, sofrendo nova descarga para a terra, através do segundo capacitor, melhorando ainda mais a filtragem.

3ª) As redes de filtro podem ser agrupadas em série ou em cascata.

4ª) A pequena flutuação da corrente retificada recebe o nome de "ripple" nos meios técnicos.

II - Retificadores de meia onda e de onda completa

1 - Retificador de meia onda

Dizemos que o retificador é de meia onda quando ele aproveita somente a metade do ciclo da corrente a ser retificada. O retificador que estudamos no item 1 é, portanto, de meia onda. Para completar a apresentação do retificador de meia onda, vamos introduzir sucintamente um componente bastante importante, tanto em eletrotécnica como em eletrônica, que é o transformador.

a) Transformador

O transformador é um dispositivo que serve para modificar as características de uma corrente alternada ou pulsante.

Assim, teoricamente, usando transformador, podemos elevar ou abaixar a corrente e a tensão de uma fonte alternada ou pulsante a qualquer valor. Entretanto, essas modificações devem obedecer à lei da conservação da energia, pois o transformador não cria energia, mas apenas a modifica. Por exemplo, se temos um gerador que fornece 100 Volts a um Ampère, ou seja, de potência de 100 watts (pois P = 100 V x 1 A = 100 W), com o transformador

podemos aumentar a tensão para qualquer valor, mas a corrente abaixa para que a potência continue a mesma. Assim, se quisermos transformar os 100 V do gerador do exemplo em 500 V, poderemos fazê-lo usando um transformador, mas a corrente máxima que esse transformador pode fornecer será de 0,2 A (dois décimos de Ampère), porque a máxima potência que ele pode fornecer é igual à aplicada, ou seja, 500 V x 0,2 A = 100 W. Evidentemente, é possível abaixar a tensão e elevar a corrente.

O importante é concluir que o produto "tensão vezes corrente", na saída do transformador, é, no máximo, igual ao produto "tensão vezes corrente", na entrada.

b) Descrição do transformador

Um transformador consta de uma ou mais bobinas enroladas sobre um mesmo núcleo, que geralmente é de ferro. A bobina onde é aplicada a energia a ser modificada recebe o nome de **primário**, e aquela (ou aquelas) de onde se retira a energia modificada recebe o nome de **secundário** ou secundários. Na **figura 20**, mostramos um transformador contendo duas bobinas, isto é, primário e

Figura 20 - Exemplo de um transformador.
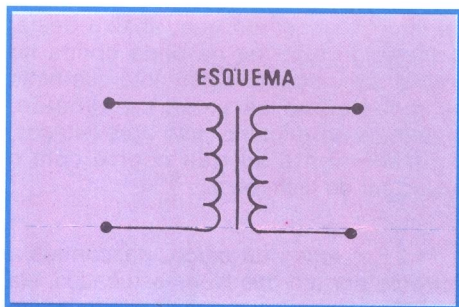
Figura 21 - Símbolo de um transformador.

secundário, enquanto que um desenho esquemático é mostrado na **figura 21** .

Figura 22 - Posicionamento das lâminas em relação ao enrolamento.

O núcleo é constituído de lâminas de ferro silicioso, isoladas entre si e empilhadas. Pode ter várias formas, porém as mais comuns são em L, E, I e F. Na figura 20, o transformador mostrado tem chapas do tipo L. Os tipos de núcleo mais usados em eletrônica são os E e I em conjunto, sendo os enrolamentos alojados na perna do E. Na **figura 22** mostramos um transformador desse tipo. Apresentamos o conjunto de lâminas E e I separadas, para que o aluno observe onde se alojam os enrolamentos, que são sobrepostos, mas, na realidade, as chapas E e I são entrelaçadas, como se indica na **figura 23**.

Figura 23 - Entrelaçamento das lâminas.

c) Como funciona o transformador

Quando se aplica corrente ao primário, essa bobina cria em volta de si um campo magnético também alternado. Por sua vez esse campo magnético variável induz na bobina do secundário uma corrente também alternada. Assim, há uma **transferência magnética** da energia do primário ao secundário.

Quando o número de espiras do primário é igual ao número de espiras do secundário, a tensão neste último é exatamente igual à aplicada. Desprezando-se as perdas que acontecem no fio e núcleo, podemos afirmar que também a corrente no secundário é igual à do primário. Tal tipo de transformador é chamado de **transformador de isolação**.

Se o número de espiras do secundário for duas, três, quatro, etc, vezes maior que o do primário, a tensão também será duas, três, quatro, etc, vezes maior que a do primário. Diz-se que o transformador é **elevador de tensão**. Caso contrário, isto é, quando o número de espiras do secundário é uma fração do número de espiras do primário, a tensão do secundário também será uma fração daquela do primário. Diz-se então que o transformador é **redutor de tensão.**

d) Transformador com tomada central no secundário

Vamos verificar agora o que acontece quando um enrolamento secundário tem uma derivação no centro do enrolamento, derivação essa que é chamada, nos meios técnicos, de **tomada central** ou, em inglês, "center-tap" que significa tomada central.

De acordo com as explicações dadas, entre cada uma das extremidades do enrolamento e a tomada central, existirá tensão, que é a mesma e igual à
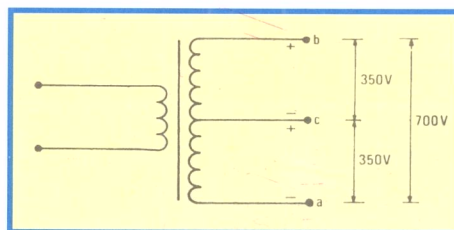
Figura 24 - Transformador com center tap.

metade da tensão total do enrolamento. Seja, por exemplo, o transformador esquematizado na **figura 24**. Se entre **a** e **b** do secundário tivermos tensão de 700 V, entre **a** e **c** teremos 350 V e, entre **c** e **b**, também 350 V. As duas partes do enrolamento de 700 V funcionam, então, como dois geradores em série. Assim, se em dado momento o terminal **b** é positivo, o terminal **a** será negativo, e o **c** mais positivo que **a**, porém negativo em relação a **b**. Indicamos esse fato com sinais + e -, na figura. O aluno deve notar que os dois sinais em **c** não querem dizer que esse terminal seja positivo e negativo, mas que ele é positivo em relação a **a** e negativo em relação a **b**. Essa observação será
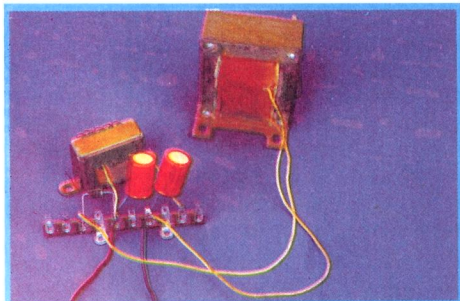
Figura 25 - Retificador de meia onda.
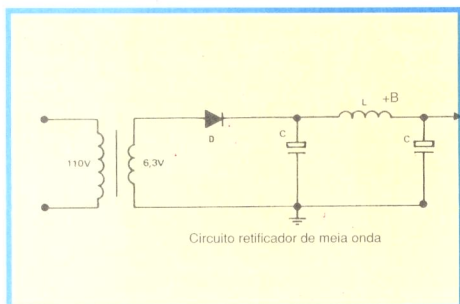
Figura 26 - Esquema do retificador de meia onda.

utilizada a seguir, quando tratarmos da retificação de onda completa.

Feito este parênteses para apresentação do transformador, componente este que será estudado detalhadamente em uma de nossas lições especiais, vamos voltar ao retificador de 1/2 onda. Assim, na **figura 25**, mostramos um circuito em que o diodo não está ligado diretamente à fonte de CA (corrente alternada), mas é utilizado um transformador que fornece tensão mais baixa que a da rede, para o diodo

Observação: Sempre que for oportuno apresentaremos, além do esquema, uma visão da montagem em aspecto real, para que o aluno habitue-se a efetuar leitura de esquemas e a localizar seus componentes, em relação ao circuito.

retificador, enquanto que o esquema respectivo é mostrado na **figura 26.**

Cabe aqui um pequeno comentário:

A tensão retificada é chamada, na grande maioria das vezes, de +B. Essa denominação, que o aluno encontrará nos circuitos esquemáticos, tem a seguinte explicação: antigamente, todos os receptores de rádio eram alimentados exclusivamente por baterias. Então, o pólo positivo da bateria era indicado no esquema pela notação +Bat, que posteriormente foi simplificada para +B.

Mais tarde passou-se a usar a tensão retificada da rede de distribuição, mas, por tradição, conservou-se a notação +B, para indicar o pólo positivo de tensão retificada.

2 - Retificador de onda completa

O retificador de meia onda, que estudamos, tem algumas desvantagens. Assim, ele aproveita somente o semiciclo positivo da corrente, o que significa baixo rendimento; necessita de valores mais elevados dos componentes do filtro, o que eleva o custo, etc. Visando diminuir esses inconvenientes, criou-se o circuito **retificador de onda completa.** Como o
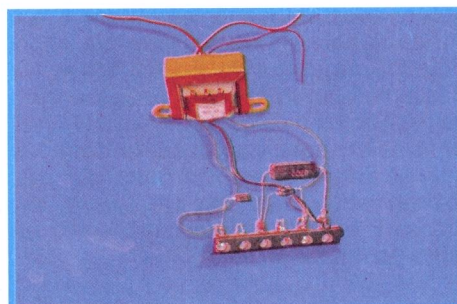
Figura 27 - Retificador de onda completa.

próprio nome sugere, trata-se de um circuito retificador que aproveita os dois semiciclos da onda. Na **figura 27**, mostramos um circuito retificador de onda completa, que aproveita a propriedade do transformador com derivação central,
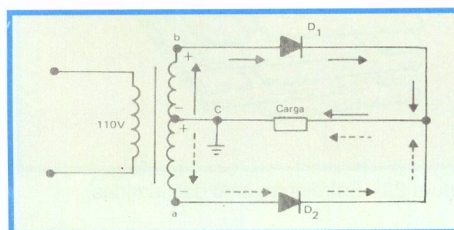
Figura 28 - Esquema do retificador de onda completa.

assinalado no item anterior. O esquema deste circuito retificador é mostrado na **figura 28**, para que o aluno faça a devida comparação e acompanhamento. Apresentamos esse circuito por ser mais fácil compreender o seu funcionamento, mas é possível obter um retificador de onda completa, usando diretamente a tensão da rede.

Como se observa, o circuito utiliza dois diodos com os cátodos ligados em paralelo (unidos entre si), tendo os ânodos ligados aos extremos do secundário do transformador. A carga é ligada entre os cátodos e a tomada central, que geralmente vai ligada ao chassi (terra). O funcionamento do circuito é o seguinte:

Imaginemos que, no semiciclo positivo da tensão aplicada ao primário do transformador, o ponto **b** do secundário seja positivo. Então, o ponto **c** é negativo em relação ao **b** e há circulação de corrente de **b** para **c** através do diodo D_1, como indicamos pelas flechas cheias. Há, então, retificação de meia onda. Como **a** é negativo em relação a **c**, o diodo D_2 não conduz corrente, porque seu ânodo fica negativo em relação ao cátodo.

Suponhamos, agora, que a tensão no primário passou para o semiciclo negativo. Então o ponto **b**, que era positivo, torna-se negativo em relação a **c**, e o diodo D_1 fica polarizado inversamente, de maneira que seu ânodo fica negativo em relação ao cátodo, e não há passagem de corrente. Por outro lado, o ponto **a**, que era negativo em relação a **c**, muda de polaridade, ou seja, passa a positivo. Então, o diodo D_2 conduz, e passa
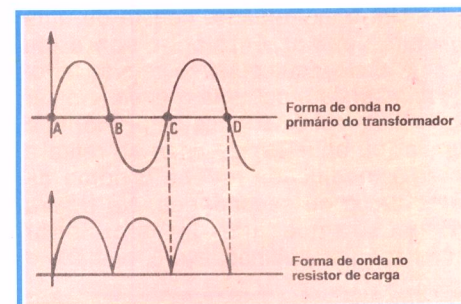
Figura 29 - Formas de onda.

corrente no sentido que indicamos pelas flechas tracejadas, na mesma figura.

Observando a corrente na carga, vemos que ela circula em um só sentido, tanto no semiciclo positivo como no negativo da tensão aplicada ao primário do transformador. Há, então, **retificação de onda completa**. Na **figura 29**, mostramos a forma de onda obtida no primário do transformador (parte superior da figura), enquanto que, abaixo desta, mostramos a forma de onda obtida no resistor de carga. O aluno nota que tanto os picos como os vales da senóide, presentes no primário, são aproveitados, contrariamente ao que ocorre com o retificador de meia onda.

Se, antes da carga, passarmos a corrente por um dos filtros estudados, ela será, "aplainada" com mais facilidade que no retificador de meia onda e sairá praticamente contínua.

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV

8ª LIÇÃO PRÁTICA

RETIFICAÇÃO DE CA

Nesta lição, vamos apresentar alguns esquemas de retificadores de meia onda, onda completa, dobradores etc., de uso corrente na maior parte dos aparelhos eletrônicos comerciais, tais como rádios, TVs, amplificadores etc., para que o aluno tome contato com esse tipo de fonte de alimentação.

I - Retificadores de meia onda

Na **figura 30**, mostramos uma fonte de meia onda, usando o retificador de silício BY100, enquanto que o seu
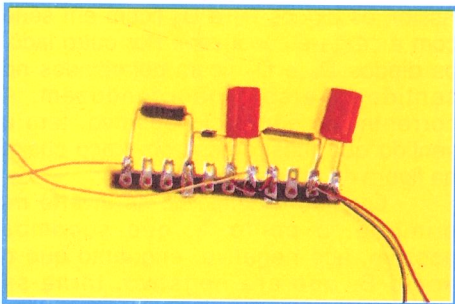
Figura 30 - Retificador de meia onda.
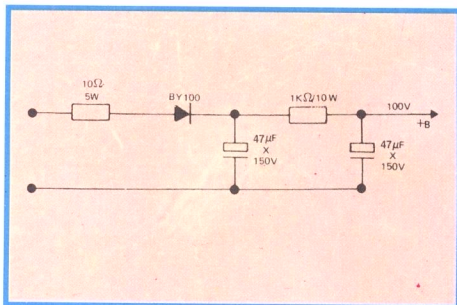
Figura 31 - Esquema do retificador de meia onda.

esquema, para comparação e acompanhamento, é mostrado na **figura 31**.

Há em série com o retificador BY100, que é um diodo de silício, um resistor de 10Ω - 5 W. A função desse resistor é evitar a queima do retificador pelo surto instantâneo de corrente.

Realmente, sabemos que, no instante inicial da carga, o capacitor agirá como um curto-circuito, se estiver descarregado. Assim, a corrente, nesse momento, que é chamada de **corrente de surto**, pode atingir valor maior do que o retificador é capaz de suportar, e ele se queimará. A corrente de surto para o BY100, indicada pelo manual, é de 25 A. O resistor de proteção pode ser facilmente determinado, ainda aplicando a lei de Ohm. De fato, se admitirmos que, no instante em que se liga o receptor, o capacitor seja um curto-circuito, e que a resistência do retificador seja nula no sentido direto (são as condições mais desfavoráveis), resulta que o resistor que limita a corrente a 25 A deve ser de 110 : 25 = 4,4Ω. Escolheu-se o valor de 10Ω, para limitar a corrente a valor bem mais baixo que 25 A. A potência também pode ser calculada pela lei de Ohm.

A corrente pulsante é retificada pelo filtro em π, composto pelos dois capacitores de 47 μF x 150 V e pelo resistor de 1 KΩ -10W.

Na **figura 32**, mostramos um circuito típico de retificador de meia onda,
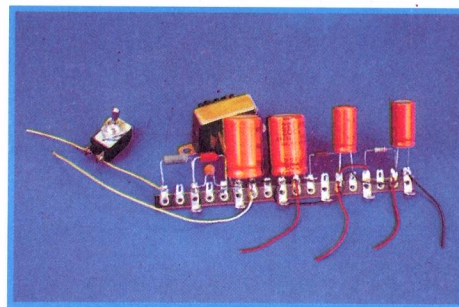
Figura 32 - Fonte retificadora de meia onda.
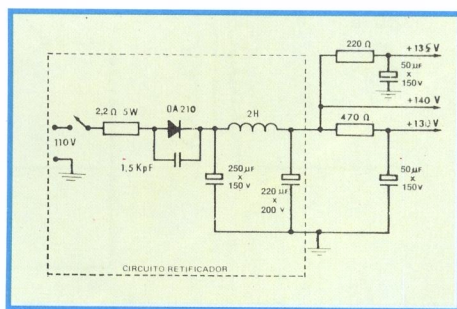
Figura 33 - Esquema de fonte retificadora de meia onda.

que é utilizado em receptor de TV, cujo esquema pode ser visto na **figura 33**.

O aluno pode observar que ele é semelhante ao circuito da figura 31. O circuito retificador é aquele que está dentro do retângulo tracejado. As demais redes de filtro são necessárias para as secções de televisor, que exigem alimentação de
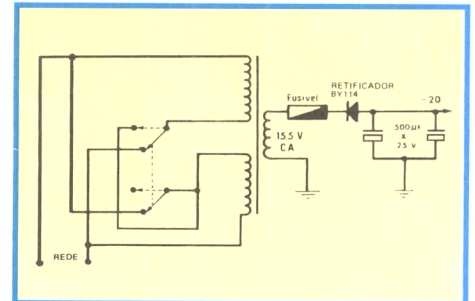
Figura 34 - Fonte do Amplificador SP-16-04.

corrente contínua mais pura.

Na **figura 34**, mostramos a fonte de alimentação do amplificador estereofônico General Eletric" SP - 16-04, transistorizado. Como se observa, é uma fonte de meia onda, convencional, onde a tensão da rede é abaixada pelo uso de um transformador. O primário do transformador é de dois enrolamentos e, quando a chave está na posição indicada na figura, os enrolamentos ficam em paralelo, correspondendo à tensão de 110 V. Se a chave passa a outra posição (tracejada, na figura), os enrolamentos ficam ligados em série o que corresponde a tensão de 220 V.

O secundário do transformador tem um de seus terminais ligado ao chassi e o outro ao retificador BY114 (ou equivalente), através de um fusível (que no caso é um pedacinho de fio 42). Como particularidade, o aluno deve notar que tanto o retificador como os capacitores estão invertidos, ou seja, o retificador tem seu cátodo ligado ao transformador, e os capacitores têm o pólo positivo ligado ao chassi. Isso não altera em nada as explicações que foram dadas na lição teórica sobre o funcionamento dos diodos como retificadores.

De fato, consideremos o retificador ligado à rede, como na **figura 35**, sendo R a resistência de carga. Admitamos que, em certo instante, é aplicado ao cátodo do retificador (ponto **a**) o semiciclo positivo
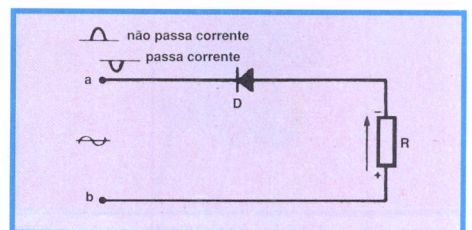
Figura 35 - Retificação de meia onda negativa.

da corrente. Evidentemente o terminal do resistor, ligado ao outro fio da rede (ponto **b**), será negativo. Nessa situação, o retificador está polarizado no sentido inverso; portanto, ele não deixa passar corrente pelo resistor. Quando a corrente da rede se inverte (semiciclo seguinte), o cátodo do retificador fica negativo e o ânodo, positivo. Isso quer dizer que o retificador está polarizado no sentido direto, e haverá passagem de corrente através da resistência de carga.Assim, só há retificação dos semiciclos em que o ponto **b** é positivo em relação a **a**, como era de se esperar.

Como o sentido convencional de percurso da corrente é do positivo para o negativo, concluímos que o terminal inferior (na nossa figura) da resistência de carga é positivo; conseqüentemente, o capacitor de filtro deve ter o pólo positivo ligado nesse terminal.

É importante não inverter a polarização do capacitor eletrolítico de filtro porque, como ensinamos na lição sobre capacitores, ele, se invertido, oferecerá resistência muito baixa e porá em curto-circuito o diodo retificador.

Fica assim esclarecido porque tanto o retificador como os capacitores estão invertidos no circuito da figura 34.

II - Retificador de onda completa

A retificação de onda completa tem a vantagem de ser mais eficiente do que a de meia onda, porque, como se viu, ela aproveita os dois semiciclos da onda alternada. Aliás, o rendimento máximo que se pode conseguir de um retificador de meia onda é de 40% e, com o retificador de onda completa, é de 80%, ou seja, duas vezes mais. Devemos esclarecer que se chama de **rendimento da retificação** a relação entre a potência de saída de corrente contínua e a potência total de corrente alternada aplicada ao diodo retificador.

Outra vantagem do retificador de onda completa é que a filtragem é feita com mais facilidade.

A retificação de onda completa, empregando-se transformador de força, é largamente usada em aparelhos de rádio do tipo chamado de mesa, em eletrolas, televisores, etc.

O circuito de uso mais corrente é o
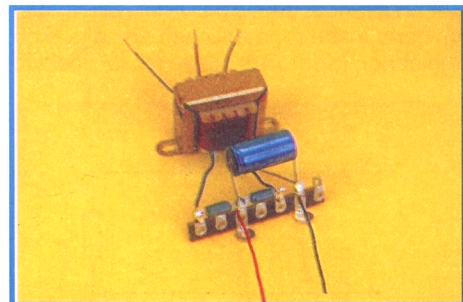
Figura 36 - Fonte retificadora de onda completa.
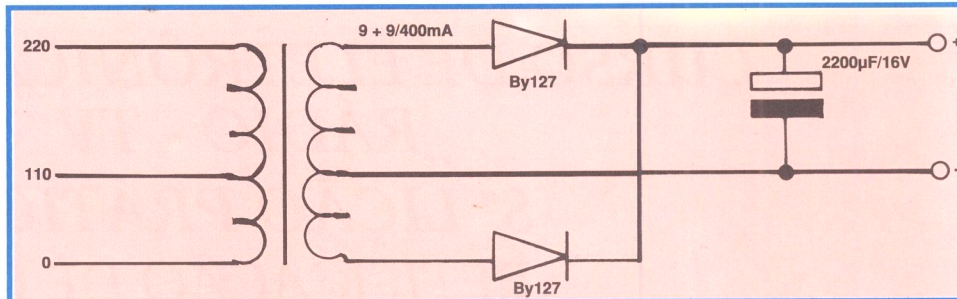
Figura 37 - Esquema de fonte retificadora de onda completa.

mostrado na **figura 36**, cujo esquema pode ser visto na **figura 37**, e que é empregado em inúmeros tipos de circuitos, e seu funcionamento é idêntico ao que descrevemos na lição teórica.

III - Retificador em ponte

O retificador em ponte também é um tipo de circuito muito empregado na prática. Na **figura 38** mostramos uma montagem que emprega este sistema de retificação, enquanto que seu esquema pode ser visto na **figura 39**. Empregam-
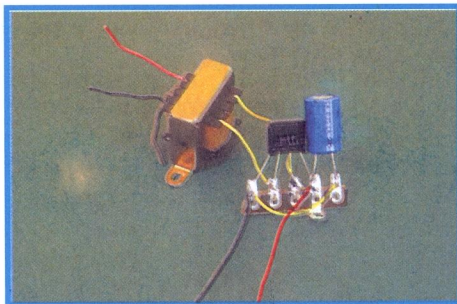
Figura 38 - Fonte retificadora em ponte.

se 4 diodos retificadores (como indicado no esquema) ou uma ponte retificadora (como empregado na foto), e um transformador simples, que não tenha derivação central. Este tipo de retificador é também de onda completa. Cada diodo é chamado de **braço** da ponte, sendo a carga conectada aos terminais da ponte que não estão ligados ao transformador, conforme podemos ver na **figura 40**.

Para compreender como funciona o circuito, suponhamos que, para o meio ciclo positivo de tensão aplicada ao primário do transformador, seu secundário tenha o ponto A positivo e, evidentemente, o B negativo. Nestas condições, o ponto 1 da ponte retificadora também apresenta o mesmo potencial que o ponto A, que, no momento, é mais positivo em relação ao ponto 2 da ponte, o que possibilita ao diodo D_1 conduzir. Por sua vez, o ponto 4 da ponte também é mais positivo que o ponto 3, o qual apresenta o mesmo potencial que o ponto B do transformador, permitindo que o diodo D_3 também conduza. Assim, os diodos D_1 e D_3 ficam em série com a carga e conduzem. Por outro lado, os diodos D_4 e D_2 ficam polarizados no sentido inverso e não conduzem. A corrente, no semiciclo positivo, tem o sentido que mostramos com traço cheio, na figura 40 (sentido real).

Quando o semiciclo se inverte no primário, o ponto A, que supomos positivo, fica negativo, enquanto que o ponto B, que era negativo, torna-se positivo. Nesta nova situação, os diodos D_2 e D_4 conduzem, porém os diodos D_1 e D_3 não, pois encontram-se inversamente polarizados, ou seja, ânodo negativo em relação ao cátodo. O sentido real da corrente é, então, o que indicamos com linhas tracejadas. Desta maneira, na carga, a corrente circula no mesmo
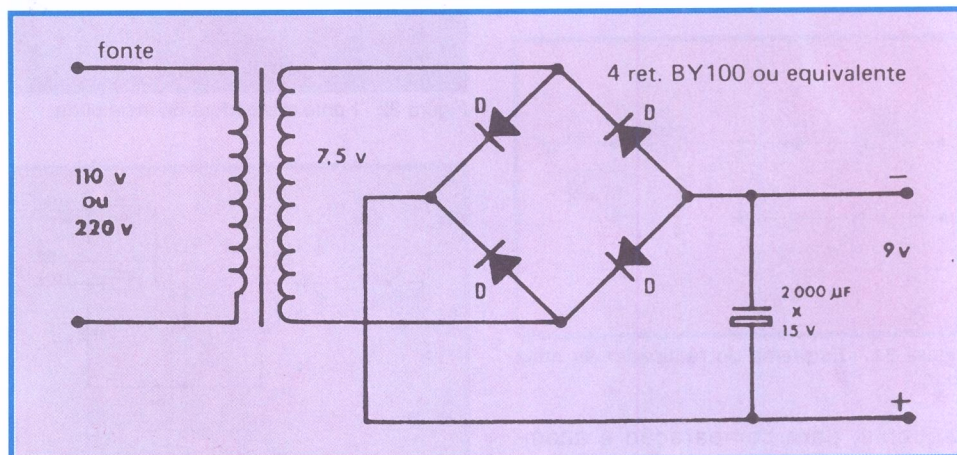
Figura 39 - Esquema da fonte retificadora em ponte.
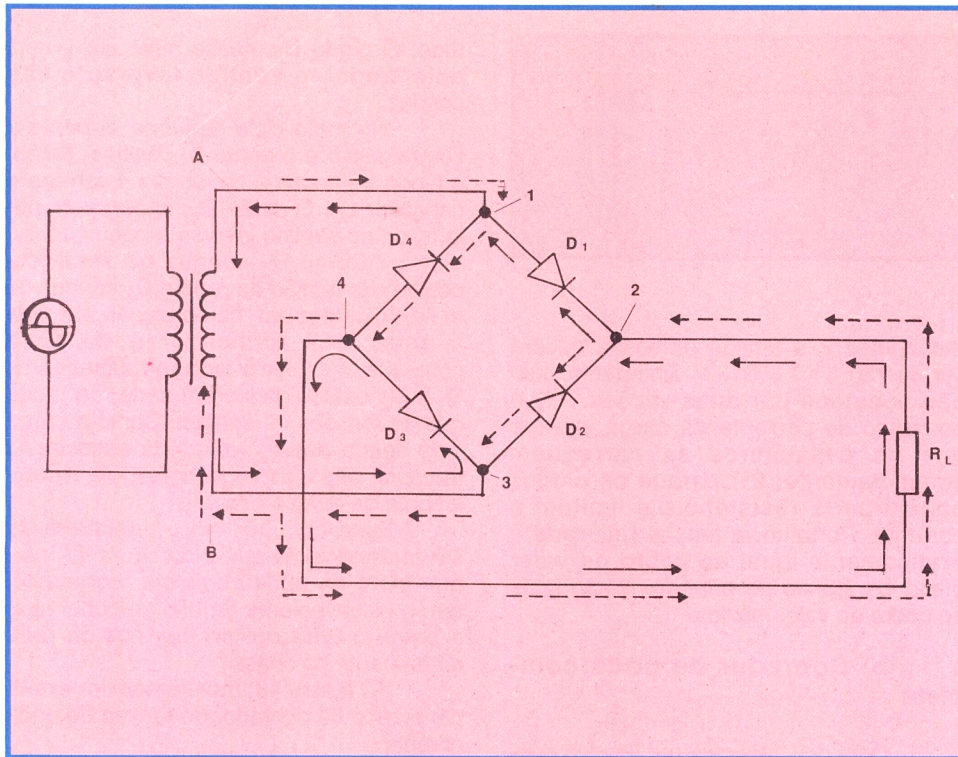
Figura 40 - Funcionamento da retificação em ponte.

sentido, durante ambos os semiciclos, portanto, há retificação de onda completa.

Visando economia de espaço, pode-se empregar, ao invés de 4 diodos em separado, uma ponte retificadora, componente que possui internamente 4 diodos interligados na configuração retificadora em ponte.
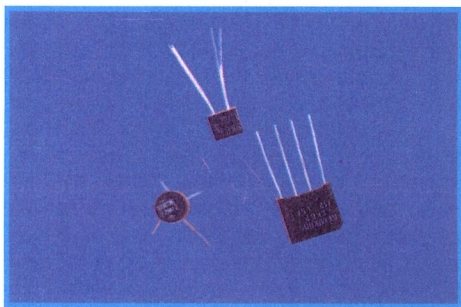
Figura 41 - Tipos mais comuns de pontes retificadoras.

Os tipos mais comuns de pontes retificadoras podem ser vistos na **figura 41**, enquanto que suas simbologias e disposição interna dos diodos são mostrados na **figura 42**.

A fonte mostrada nas figuras 38 e 39, como dito anteriormente, consiste num exemplo de circuito retificador em ponte; projetada para fornecer 9 Volts, para substituir a bateria de aparelhos transistorizados que trabalham com essa tensão. O aluno identifica o transformador que reduz a tensão de rede para 7,5 V, os quatro retificadores em ponte e um capacitor de filtro de valor elevado, ou seja, 2000 μF x 15 V. A carga, logicamente, será o aparelho que se ligará aos terminais + e - da fonte.

Figura 42 - Simbologia e disposição interna dos diodos internos à ponte retificadora.

IV - Dobradores de tensão

Como o aluno pode observar, analisando os circuitos de fontes retificadoras sem transformador (figuras 31 e 32), a tensão retificada que se consegue é menor que o valor máximo da tensão alternada da rede. Isto limitava, exclusivamente a aparelhos de baixa tensão de +B, o uso das fontes sem transformador.

Procurando resolver esse problema, chegou-se aos circuitos multiplicadores de tensão, dos quais os mais divulgados são os **circuitos dobradores** de tensão, que, como o nome sugere, permitem obter corrente retificada de tensão igual a duas vezes a tensão da rede, ou seja, quando a tensão alternada é de 110 Volts, conseguem-se cerca de 220 V de tensão contínua e, no caso da tensão ser de 220 V, conseguem-se até 440 V de tensão contínua.

Os dobradores de tensão também podem ser de meia onda ou de onda completa.

a) Dobrador de meia onda

O circuito básico do dobrador de meia onda está indicado na **figura 43**, enquanto que, na **figura 44**, ilustramos um exemplo de circuito real do mesmo. O aluno identifica dois capacitores eletrolíticos e dois diodos. O funcionamento do circuito é o seguinte.

Admitamos que a tensão alternada de entrada esteja variando no semiciclo negativo. Então o ponto **a**, ligado à armadura do capacitor C_1, é negativo, e o ponto **b** é positivo. Nestas condições, o diodo D_1 está polarizado no sentido da condução e carrega o capacitor C_1. No semiciclo seguinte, o ponto **a** passa a positivo e o **b** a negativo. Quando isso se dá, o diodo D_1 não conduz mais, porque fica polarizado inversamente, e o capa-
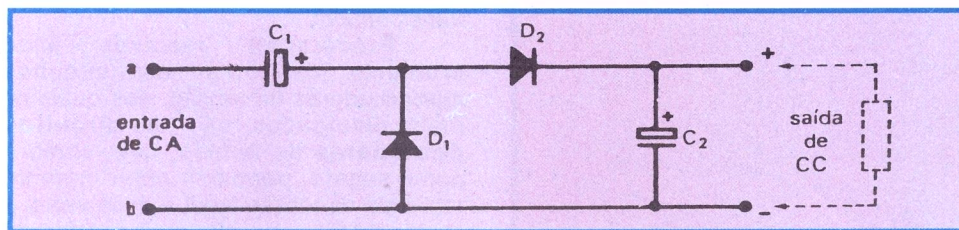
Figura 43 - Dobrador de meia onda.
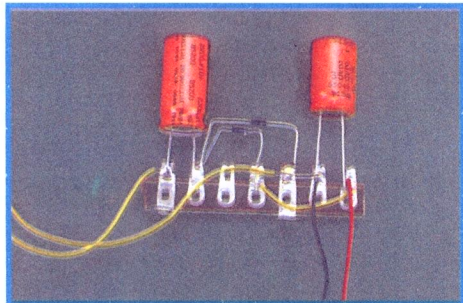
Figura 44 - Circuito do dobrador de meia onda.

citor C_1, que está carregado, fica em série com a fonte, de modo que sua tensão se soma à da fonte. Agora, o retificador D_2 fica polarizado corretamente e carrega o capacitor C_2. No semiciclo seguinte, tudo se repete da mesma maneira.

A retificação é de meia onda porque, no primeiro meio ciclo (o negativo), o capacitor C_1 se carrega e, somente no outro meio ciclo, a corrente passará à carga (tracejada, em nossa figura).

Na **figura 45**, mostramos o esquema de um dobrador de meia onda, usado em receptor de TV. Esse tipo de retificação foi muito usado pela maioria dos fabricantes de televisores. Tem vantagem sobre as fontes com transformador, pois economiza este último componente, que é caro, e também economiza espaço, o que é bastante importante.

O capacitor de entrada (C_1, na figura 43) carrega-se com a amplitude máxima da onda alternada, ou seja, 110 x 1,41 = 155,1 V; portanto, deve ser escolhido aquele que tenha voltagem de trabalho superior a esse valor. Existem no mercado capacitores com tensão de isolação de 200 V, construídos especialmente para as fontes dobradoras.

Os capacitores, como se viu, carregam-se com a amplitude máxima de tensão, ou seja, 155,1 V, de modo que, teoricamente, a tensão retificada deverá ser de 155,1 x 2 = 310 V. Entretanto, isso não acontece por duas razões: 1ª) o consumo de corrente da carga impede que os capacitores se carreguem completamente; 2ª) porque os diodos opõem certa resistência e limitam a corrente. Portanto, a tensão retificada é praticamente igual ao dobro do valor eficaz da tensão de entrada, e não igual ao dobro do valor máximo.

b) Dobrador de onda completa

Com dois retificadores ligados convenientemente à rede de alimentação, é possível montar-se uma fonte retificadora de onda completa sem transformador, como mostramos na **figura 46**, e cujo esquema pode ser visto na **figura 47.**

O funcionamento dessa fonte também é simples e pode ser explicado da seguinte maneira:
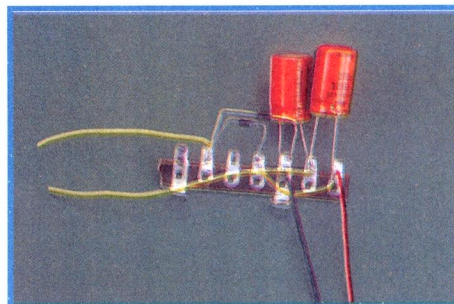
Figura 46 - Circuito dobrador de onda completa.

Consideremos o instante em que o semiciclo positivo está sendo aplicado ao diodo D_1, ou seja, o ponto **a** é positivo. Logicamente o ponto **b** negativo, e o diodo D_1 fica polarizado no sentido da condução. Então o capacitor C_1 carrega-se, teoricamente, com o valor da máxima amplitude. O diodo D_2, nesse meio ciclo, está polarizado no sentido inverso e não conduz.

No meio ciclo seguinte, o ponto **a** fica negativo e o ponto **b**, positivo. Então, o diodo D_2 passa à condução e carrega o capacitor C_2. O diodo D_1, agora, está polarizado no sentido inverso e não conduz.

Como D_1 conduz no semiciclo positivo da tensão da rede e D_2 conduz no meio ciclo negativo, há condução em toda a onda, e o retificador é de onda completa. Por outro lado, os capacitores C_1 e C_2 estão ligados em série, de modo que as tensões se somam. Como a carga está ligada aos extremos da associação em série dos dois capacitores, ela recebe a soma da tensão dos dois.

Esse circuito tem a vantagem de ser mais eficiente que o da figura 43, porque ele é de onda completa; entretanto, tem o inconveniente de não se poder ligar a carga à terra ou um dos fios da rede diretamente no chassi.

Na **figura 48**, mostramos um exemplo prático do dobrador de tensão de onda completa.

O aluno nota, nesse esquema, que foi usado um transformador que fornece os 6 V, eletricamente isolado da rede. O indutor de filtro está ligado no terminal negativo da fonte.

c) Multiplicador de tensão

Nos itens **a** e **b**, apresentamos os dobradores de tensão, que são os circuitos mais usados na prática; entretanto, teoricamente, é possível obter qualquer valor de tensão retificada, ligando-se convenientemente retificador e capacitores. De fato, se os ligarmos em cascata, a tensão irá dobrando a cada fonte igual que se acrescente. Na **figura 49**, mostramos uma fonte que daria tensão 4 vezes maior que a aplicada. Como o aluno nota, trata-se de 3 dobradores de tensão de meia onda, ligados em cascata, isto é, os terminais de saída de um aos de entrada do outro, e assim sucessivamente.

Esse sistema de multiplicador de tensão foi empregado para obter a alta tensão (35 000 Volts), para alimentar o tubo de imagem dos primeiros televisores de tela grande do tipo projeção, isto é, a imagem era obtida em um tubo pequeno de 3 polegadas e, depois, projetada na tela do aparelho, através de espelhos.

Atualmente, é muito empregado, em televisores a cores, um tipo específico de multiplicador de tensão, chamado de triplicador, e que, como o próprio nome sugere, possui a característica de multiplicar por 3 a tensão de entrada que lhe é aplicada. Na **figura 50** mostramos alguns tipos de triplicadores utilizados na prática.

Figura 45 - Esquema comercial de dobrador de meia onda.

V - Considerações práticas sobre fontes

1ª - A fonte deve ter características de tensão e de corrente adequadas ao

Figura 47 - Esquema do dobrador de onda completa.

Figura 48 - Esquema de um dobrador de onda completa.

Figura 49 - Multiplicador de tensão.

circuito que irá alimentar. Assim, se um dispositivo requer 200 V e 0,5 A, não se pode utilizar fonte que forneça os 200 V, mas que não comporte o consumo dos 500 miliampères, porque o diodo se esgotará rapidamente. Se uma fonte tem, por exemplo, retificadores para corrente de 400 mA, de modo algum se deve substituí-los por outros de menor capacidade de corrente. Note que substituí-los por outros de maior

Figura 50 - Triplicadores de tensão.

capacidade de corrente não teria importância, ou antes, permitiria uma reserva de corrente, já que a carga, em funcionamento normal, não exige corrente maior que a especificada.

2ª - A substituição dos componentes da fonte deve ser feita sempre por outros exatamente iguais, ou por outros de características melhores. Por exemplo, se uma fonte tem o indutor de filtro de 6 H aberto (interrompido), devemos substituí-lo por outro que tenha a mesma indutância e cujo fio permita a passagem da corrente requerida pela carga. Admitamos que ela seja de 200 mA. Então, vamos ao mercado especializado e pedimos um indutor, também chamado de **choque de filtro**, que tenha indutância de 6 Henrys e para corrente de 200 mA. Suponhamos que não seja possível encontrar o choque com essas características; então, devemos optar por outro que tenha valores superiores, seja de indutância e/ou corrente. Por exemplo, serviria outro de 10 H - 200 mA, 6 H - 250 mA etc.

Quanto aos capacitores, valem as mesmas observações. Assim, nunca devemos substituir capacitores de filtro por outros que tenham menor tensão de trabalho.

Quanto a capacitância, deve ser igual ou maior que a original. Assim, se formos substituir um capacitor de 32 μF x 150 V e só conseguirmos outro de 40 μF x 160 V, poderemos utilizá-lo tranqüilamente.

3ª - A substituição de fusíveis não admite essa flexibilidade. Assim, os fusíveis devem ser trocados por outros **rigorosamente** iguais aos originais.

VI - Defeitos na fonte

Os defeitos nas fontes de alimentação convencionais são bastante simples. Os mais comuns são:

a) Queima do diodo retificador

A queima do diodo retificador geralmente acontece em conseqüência de curto-circuito, que pode ser nos capacitores eletrolíticos ou na carga, sendo que estamos chamando de carga o restante do circuito que é alimentado pela fonte.

Nesse caso, desliga-se o aparelho e, com um ohmímetro, verifica-se qual o componente em curto. Uma vez encontrado, faz-se a sua substituição e, em seguida, a do diodo retificador.

Deve-se ter por norma nunca trocar diodo retificador, sem antes ter eliminado a causa da queima.

b) Zumbido

Os aparelhos de radiorrecepção e amplificadores de som podem apresentar um zumbido no som. Isto acontece quando os capacitores eletrolíticos perdem sua capacitância. Neste caso, pega-se um novo, encostando seus terminais nos dos capacitores da fonte. Em um deles o ronco desaparece. Este deve ser substituído. Deve-se tomar cuidado, tanto na prova que sugerimos como na substituição, para **não inverter** a polaridade, pois isso danifica o eletrolítico e possivelmente queimaria o diodo retificador.

c) Falta de tensão retificada

Nas fontes que utilizam transformador, quando não há tensão retificada e os retificadores estão em bom estado, devem ser verificados os enrolamentos do transformador. Para isso, desliga-se o aparelho e, usando-se o ohmímetro, verifica-se a continuidade do enrolamento, colocando as pontas de prova do instrumento nos terminais de ligação do transformador.

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV
8ª LIÇÃO ESPECIAL
GRÁFICOS (2ª PARTE) E TRANSFORMADORES (1ª PARTE)

III - Construção do gráfico

Para construir o gráfico, podemos partir da fórmula matemática, atribuir valores a uma das variáveis e calcular a outra. Então, para cada valor resulta um par de coordenadas. Levando-se uma série de coordenadas ao sistema de eixos, teremos uma coleção de pontos, os quais, unidos determinarão a curva.

Vejamos um exemplo:

Consideremos o circuito da **figura 11**, onde temos um gerador, cuja tensão pode ser variada de 2 em 2 volts, ligado a uma resistência desconhecida, em série com um amperímetro.
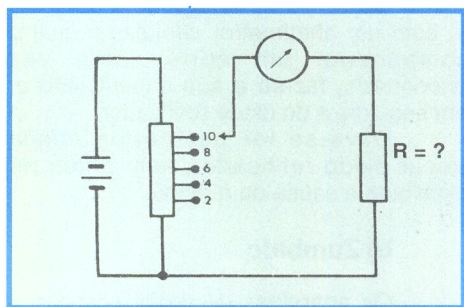
Figura 11 - Circuito para levantamento de gráfico.

Sabemos que, aplicando tensão à resistência, vai circular corrente, a qual será indicada pelo amperímetro. Então, tomaremos um papel e faremos duas colunas, sendo que, em uma, marcaremos o valor da tensão que vamos aplicar e, na outra, anotaremos os valores que o amperímetro indicar. Como a tensão só pode variar de 2 em 2 volts, marcaremos 2, 4, 6, 8 e 10, na coluna das tensões, como mostramos na **figura 12.**

$V_{(V)}$	$I_{(A)}$
2	
4	
6	
8	
10	

Figura 12 - Tabela para levantamento de gráfico.

Agora, colocamos o gerador na posição de 2 V. Admitamos que o amperímetro indicou 0,5 A. Marquemos esse valor na coluna das correntes, em frente a 2 V. Passemos o gerador para 4 V; o amperímetro indica, nessa situação, 1 A. Marquemos esse valor, na coluna das correntes, em frente ao 4. Passando o gerador para 6, 8 e 10 V, admitamos que as correntes indicadas pelo amperímetro sejam, respectivamente, 1,5, 2 e 2,5 A. Marquemos esses valores em frente à tensão correspondente e temos o quadro da **figura 13.** Esse quadro é o que se chama de **tabela de valores.**

$V_{(V)}$	$I_{(A)}$
2	0,5
4	1,0
6	1,5
8	2,0
10	2,5

Figura 13 - Tabela para levantamento de gráfico já preenchida.

A partir dessa tabela, podemos construir o gráfico. De fato bastará marcar no gráfico os pontos de coordenadas (2, 0,5), (4, 10), (6, 1,5), (8, 2) e (10, 2,5) e ligá-los entre si. Façamos isso.

Inicialmente, tomemos uma folha de papel e tracemos nela dois eixos ortogonais, isto é, que fazem entre si um ângulo de 90°. Graduemos os dois eixos. Vamos escolher o eixo vertical para eixo das tensões e o horizontal para eixo das correntes. Como a tensão varia de 0 a 10 V, vamos escolher a escala de 1 V : cm. Já que a variação da corrente é menor - 0 a 2,5 - , vamos escolher uma escala maior por exemplo, de, 5 A : cm (= 1 A : 2 cm). Agora, pelo ponto do eixo vertical correspondente a ordenada de 2 V, ou seja, 2 cm no eixo, riscamos uma reta tracejada paralela ao eixo horizontal. Em seguida, pelo ponto 0,5 A (1 cm) do eixo horizontal, riscamos uma reta tracejada, paralela ao eixo vertical. Onde essas duas retas tracejadas se cortam, temos o ponto P1 de coordenadas (0,5, 2).

Do mesmo modo, pelo ponto correspondente a 4 V, no eixo vertical, riscamos nova reta tracejada, paralela ao eixo horizontal e, pelo ponto correspondente a 1 A, no eixo horizontal, riscamos a reta tracejada paralela ao eixo vertical.

Onde essas duas retas se cruzarem, teremos o ponto P2 de coordenadas (1, 4).

Pelo mesmo processo, locaremos os pontos P3 de coordenadas (1,5, 6), P4 de coordenadas (2, 8) e P5 de coordenadas (2,5, 10). Finalmente, unindo esses 5 pontos na seqüência correta, isto é, P1 a P2, P2 a P3, P3 a P4 e P4 a P5, teremos a curva de variação da corrente com tensão, ou, simplesmente, a curva tensão X corrente da resistência ensaiada. Tudo isso está mostrado na **figura 14.**
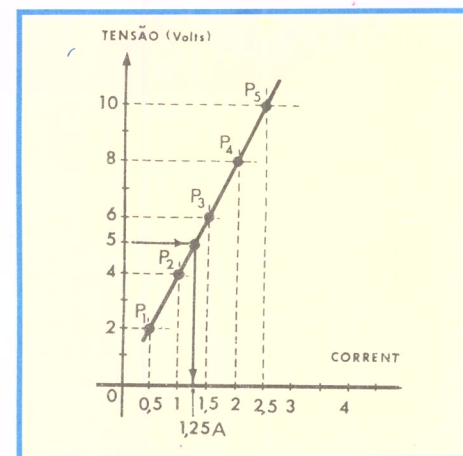
Figura 14 - Construção do gráfico.

Como se observa, construímos uma tabela e, a partir dela, o gráfico. Então, seria lógico pensar que não há interesse na construção do gráfico. Não é assim:

1º) porque o gráfico dá, imediatamente, uma visão de conjunto, ou seja, da forma como uma grandeza varia em função da outra. Em nosso exemplo, vemos que a corrente varia com a tensão,

segundo uma reta. Diremos, então, que a variação é **linear**;

2º) o gráfico permite que se obtenham, rapidamente, valores que não constam da tabela. Por exemplo, se desejarmos saber qual a corrente que resultará, ao aplicarmos 5 V ao resistor, não haverá necessidade de efetuar nova medida. Bastará traçarmos, pelo ponto de ordenada 5 V, uma reta paralela ao eixo das correntes, até cortar a curva. Desse ponto, baixamos uma paralela ao eixo das tensões, até encontrar o eixo das correntes. Nesse ponto, lemos a corrente na escala adequada. Essa prática, que se chama **interpolação**, também está indicada na figura 14. O aluno nota que, do ponto correspondente a 5 V, alcançamos a curva no ponto P. Daí, alcançamos o eixo das correntes no ponto I. Como ele está exatamente na metade do segmento 1 - 1,5 A, o valor da corrente será de 1,25 A. Por este exemplo, o aluno percebe, também, a vantagem do eixo ser graduado, pois, se assim não fosse, seria necessário medir a distância do ponto-origem até I e, conhecendo-se a escala, fazer a conversão. De fato, suponhamos que o eixo das correntes não estivesse graduado. Então, com a régua, mediríamos a distância de 0 a I. Encontraríamos 2,5 cm. Como a escala é de 0,5 A : cm, temos que multiplicar 0,5 A : cm por 2,5 cm, para obter a corrente. Dará:

$$0{,}5\ A : cm \times 2{,}5\ cm = 1{,}25\ A$$

como era de se esperar.

1 - Aplicação dos gráficos na representação das características de válvulas e transistores

Como frisamos, em eletrônica aplicada, usam-se constantemente os gráficos, principalmente porque a maioria dos dispositivos, tais como válvulas, transistores, etc., tem variação que não é linear e não pode ser escrita sob forma matemática simples. Sabemos, por exemplo, que a corrente de coletor de um transistor varia de acordo com a tensão que se aplica entre o emissor e o coletor e, também, de acordo com a corrente de base. Se a variação de corrente fosse sempre proporcional à tensão, isto é, se, dobrada a tensão, dobrasse também a corrente, para qualquer valor, então a variação seria linear e poderia ser escrita sob a forma da lei de Ohm, e qualquer problema seria resolvido matematicamente, pela aplicação da fórmula. Mas, isso não acontece, porque o fenômeno obedece à lei de Ohm até um determinado valor de tensão e, daí para diante, passa a reger-se por lei completamente distinta, quase sempre de difícil formulação matemática. Então, é muito mais cômodo o uso de gráficos. É por esse motivo que toda indústria de componentes eletrônicos levanta as principais curvas de seus produtos e as distribui aos técnicos projetistas.

Na **figura 15**, apresentamos a
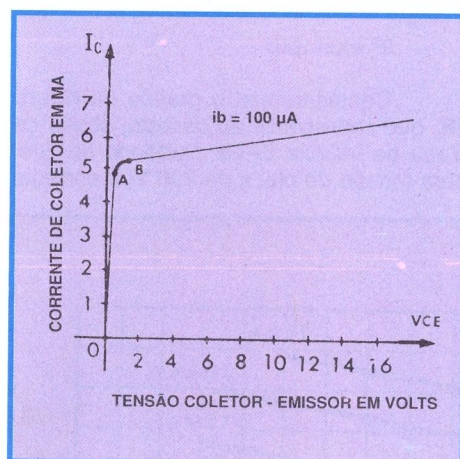
Figura 15 - Curva característica de coletor.

curva característica de coletor, típica de um transistor.

Observe o aluno como acontece tudo aquilo que temos afirmado. No trecho OA, a curva é linear e uma pequena variação na tensão de coletor produz grande variação na corrente. No trecho AB, a curva deixa de ser linear, voltando a sê-lo, a partir de B. O trecho AB recebe o nome de **joelho** da curva.

Essa curva foi levantada, fixando-se o valor da corrente de base em 100 µA, variando-se a tensão coletor-emissor entre 0 e 16 V, anotando-se as correntes de coletor.

Nas aplicações práticas, somente uma curva, como a mostrada na figura 11, não basta, pois o aluno sabe que a corrente de base do transistor varia de acordo com o sinal aplicado. Então, deve ser traçada uma curva para cada corrente de base, escolhendo-se um intervalo de variação conveniente. Em seguida, locam-se todas as curvas em um mesmo gráfico e tem-se o que se chama de **família de curvas características de coletor** ou, abreviadamente, características de coletor. Na **figura 16**, mostramos uma família de curvas características de coletor, semelhante às que o aluno encontrará nos bons manuais ou nos folhetos dos fabricantes.

Quando se trata de válvulas, as curvas características recebem o nome de **característica de placa** (ou ânodo). São levantadas do mesmo modo como se indicou para o transistor, ou seja, fixa-se a tensão negativa de grade de controle,
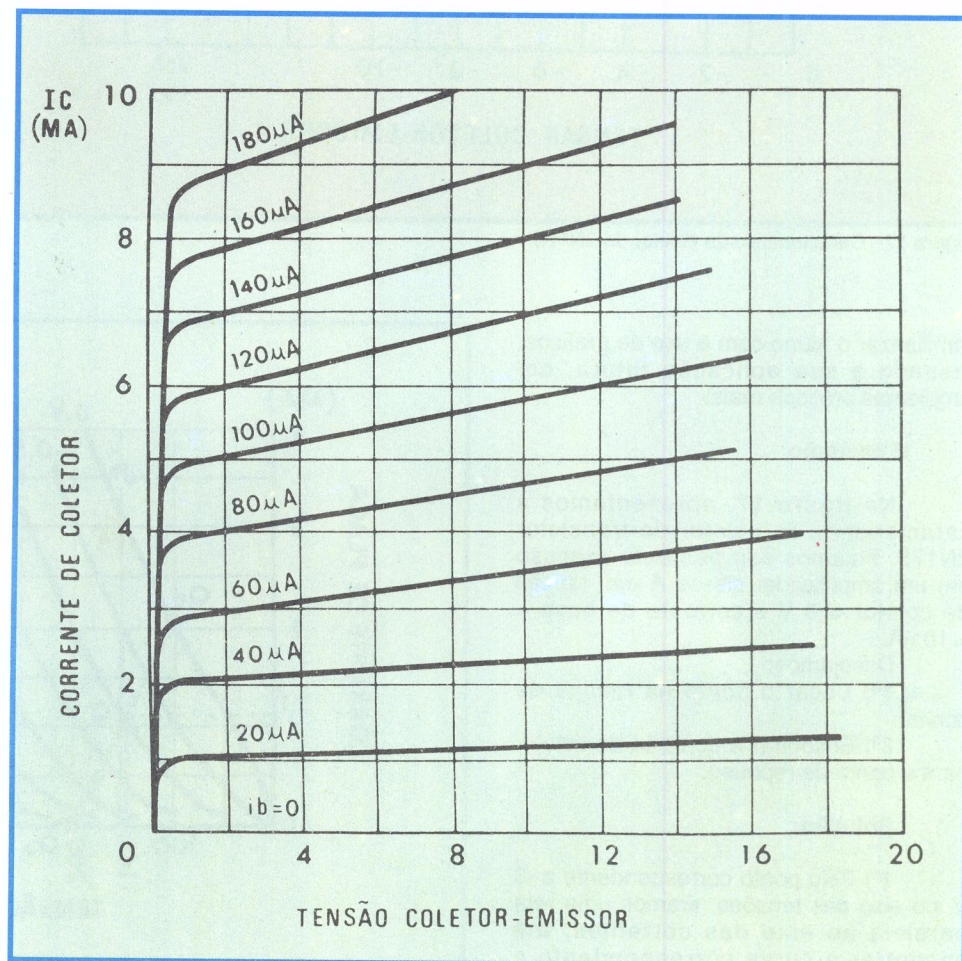
Figura 16 - Família de curvas.

varia-se a tensão de ânodo e lê-se a corrente de ânodo. Faz-se isso para diferentes tensões de grade. Todas as curvas são levadas a um mesmo gráfico,resultando a **família de curvas características de placa**.

2 - Exemplos simples de emprego de gráficos

Os exemplos que apresentamos, nas linhas seguintes, têm por objetivo familiarizar o aluno com o uso de gráficos, visando a sua aplicação futura, em problemas práticos reais.

Figura 17 - Característica de coletor do 2N175.

1º exemplo

Na **figura 17**, apresentamos a característica de coletor do transistor 2N175. Fixamos seu ponto de repouso em um amplificador classe A em: tensão de coletor = 3 V e corrente de base = = 10 μA.

Desejamos:

1º) Locar o ponto na família de curva.

2º) Encontrar a corrente de coletor para o ponto de repouso.

Solução:

1º) Pelo ponto correspondente a -3 V, no eixo das tensões, tiramos uma reta paralela ao eixo das correntes, até encontrar a curva correspondente a 10μA. O ponto de encontro da reta traçada com a curva de 10 μA, que chamamos de Q, é o ponto de repouso.

2º) Para resolver a segunda parte do problema, basta traçar por Q uma reta paralela ao eixo das tensões, até encontrar o eixo das correntes. O valor 0,8 mA, lido nesse eixo, é a resposta do problema.

A solução gráfica está indicada na figura 17.

2º exemplo

Consideremos o gráfico da **figura 18,** que representa as características de placa da válvula 6AV6. Sabendo-se que, para tensão de placa de 200 V, a corrente de placa é 0 mA e que, para tensão de placa de 100 V, a corrente sobe para 2,2 mA, pede-se:

1º) Locar os dois pontos no gráfico.

2º) Traçar a reta, unindo esses dois pontos.

3º) Determinar o ponto de repouso para tensão de grade de - 1 V.

4º) Indicar a excursão do ponto de repouso, quando a tensão de placa varia de 100 a 200 V.

Solução:

1º) O primeiro ponto tem coordenadas (200,0) e o segundo (100, 2,2); logo, basta marcar esses valores no gráfico e teremos os pontos Q1 e Q2 desejados.

2º) Esse item não apresenta nenhuma dificuldade, pois basta unir o ponto Q1, ao Q2. Essa reta é a chamada **reta de carga** do amplificador e como veremos mais tarde, sua inclinação é determinada pelo valor ôhmico da resistência de carga.

3º) Para determinar o ponto de repouso, basta verificar onde a reta de carga corta a curva correspondente a - 1V. Temos o ponto Q. Desse ponto, baixando uma perpendicular ao eixo das tensões, encontramos o valor da tensão de repouso, que é de 145 V. Agora, baixando a perpendicular ao eixo das correntes, encontramos a corrente de repouso, que é de 1,1 mA.

4º) Finalmente, como ponto Q só pode variar sobre a reta de carga, vemos que para a tensão mais baixa (100 V) ele coincide com Q1, que corresponde à tensão de grade de 0 V e, para a tensão maior (200 V) ele coincide com Q2, que está sobre a curva de tensão de grade de - 3 V, aproximadamente. Logo, a excursão

Figura 18 - Características de placa da válvula 6AV6.
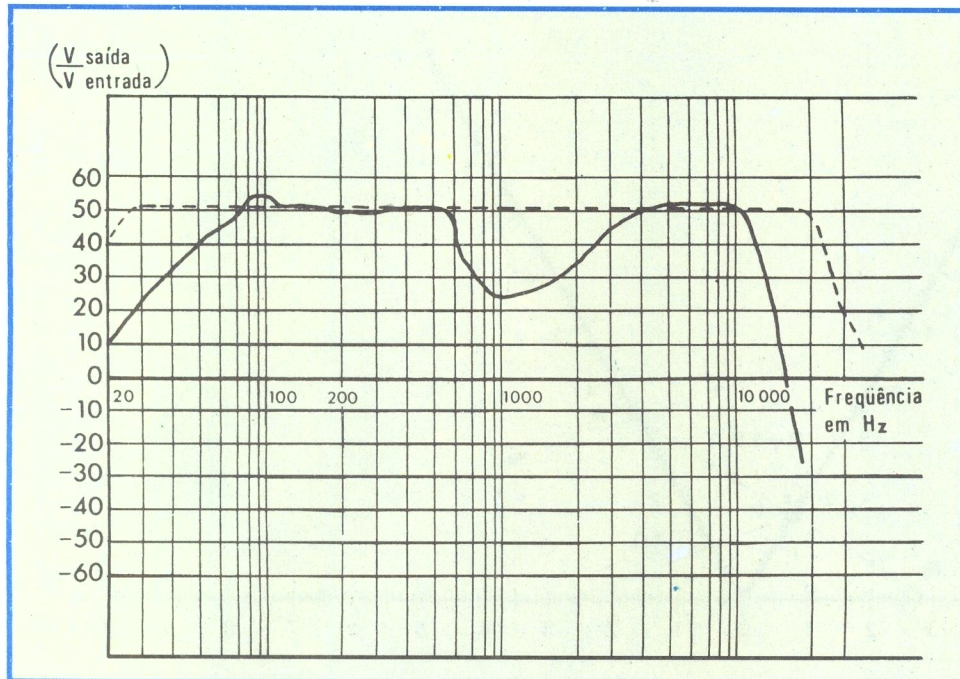
Figura 19 - Curva de resposta de um amplificador.

do ponto de trabalho é de 3,0 V, ou seja, de 0 a - 3 V.

Tudo isto está mostrado na figura 18.

3º exemplo

Na **figura 19**, mostramos o gráfico da curva de resposta de um amplificador de som. Opinar sobre a qualidade do amplificador, apenas pela análise da curva.

Solução:

Observando a curva de resposta, concluímos que o amplificador é péssimo. De fato, para que ele fosse bom, deveria apresentar uma **curva plana**, ou seja, ganho igual em todas as freqüências, desde 20 Hz até, aproximadamente, 20 KHz. Isso não acontece. O aluno observa que, em 20 Hz, o ganho é 10. Depois, vai subindo até atingir 50, em 80 Hz. Em 90 Hz, ultrapassa 50. De 100 Hz a 500 Hz, o ganho mantém-se aproximadamente constante em 50. De 500 a 1000 Hz, o ganho cai para 25, subindo, após, para atingir 50 em 4 000 Hz. Daí, mantém-se aproximadamente constante até 10 000 Hz, caindo a zero para cerca de 15 000 Hz.

Conclusão. O amplificador é péssimo.

Observações:

1ª) - Apresentamos este exemplo para que o aluno sinta como um gráfico nos permite tirar conclusões rápidas e precisas.

2ª) O aluno deve ter notado que a graduação do eixo das freqüências começou em 20 e, não, no zero. Essa mudança de origem é muito comum; pode ser feita para qualquer dos eixos ou para os dois, simultaneamente. Por exemplo, suponhamos que o amplificador do exercício devesse ser ensaiado somente entre 100 e 1000 Hz. É claro que bastaria, então, graduarmos o eixo das freqüências só a partir de 100 Hz. Por outro lado, no ensaio, encontramos o ganho entre 25 e 50. Então, podemos começar a graduação do eixo dos ganhos (vertical), a partir do 20.

3ª) Para que o amplificador fosse considerado de alta-fidelidade, ou seja, excelente na resposta de freqüências, a sua curva deveria ter o aspecto daquela que mostramos em tracejado, na figura 19.

4ª) Na prática, a curva de resposta dos amplificadores é traçada graduando-se o eixo dos ganhos em decibéis (abrevia-se db), que é uma relação logarítmica entre tensões ou potências, e toma-se como referência a freqüência de 1000 Hz. Então, fica mais fácil observar as freqüências em que há **reforço**, ou seja, amplificação maior do que a que se dá em 1000 Hz, ou aquelas em que há **atenuação**, isto é, amplificação menor do que em 1000 Hz. No capítulo referente a alta-fidelidade, voltaremos ao assunto, com mais detalhes.

4º exemplo - Ábacos

Existem gráficos, onde é necessário entrar com mais de dois valores, para se determinar a grandeza procurada. Esses gráficos são geralmente chamados de **ábacos**. Quase sempre se constituem em 3 ou mais eixos, convenientemente graduados, e dispostos de modo a facilitar a utilização.

Como exemplo ilustrativo, na **figura 20** apresentamos um ábaco que permite calcular a resistência equivalente de dois ou mais resistores em paralelo (ou capacitores em série). Em resumo, esse ábaco substitui a expressão matemática:

$$\frac{1}{RT} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \ldots$$

Exercício:

Utilizando o ábaco da figura 20 vamos calcular a resistência equivalente da associação, em paralelo, de 3 resistores, respectivamente de 10, 5 e 3 Ohms.

Solução:

Sobre o semi-eixo horizontal 0A marcamos um dos resistores, o de 10 Ω, por exemplo (podia ser qualquer um). Sobre o semi-eixo 0B marcamos outro resistor, por exemplo o de 5 Ω. Agora, unimos os dois pontos (P1 e P2 no ábaco). O encontro com o semi-eixo 0C dará o equivalente desses dois resistores em paralelo (P3). Finalmente, marcamos o valor do resistor que está faltando (3Ω, no caso) sobre o eixo 0D (ponto P4). Ligamos P3 e P4 e, onde a reta P3P4 corta 0B, ponto P, lemos o resultado. No caso, deu 1,5 Ω.

Notas:

1ª) Esse ábaco dará muito boa precisão somente quando a relação entre os resistores for, aproximadamente, 5 ou menos.

2ª) Se os resistores forem múltiplos de 10, bastará acrescentar os zeros na leitura final. Assim, se no exemplo resolvido tivéssemos tomado resistores de 100, 50 e 30 Ω, resolveríamos do mesmo modo e teríamos, como resultado, 1,5 x 10, ou seja, 15 Ω.

3ª) O ábaco serve para qualquer número de resistores. Basta considerar o último resultado e prosseguir, na prática, de maneira sempre igual.

Por exemplo, se tivéssemos mais um resistor em paralelo, digamos de 2,5 Ω, bastaria ligar o ponto P (1,5) ao 2,5 do semi-eixo 0A e ler o resultado em 0C. No caso, encontraríamos 1 Ω. No ábaco, indicamos esta última prática pela linha de pontos e traços.

Para encerrar estas linhas, queremos informar ao aluno que, na prática, em qualquer ramo tecnológico, se encontrarão gráficos e ábacos, que facilitam a solução dos problemas mais complicados. Esta é uma forte razão para que o aluno dedique bastante atenção às explicações que acabamos de expor.

Figura 20 - Exemplo de ábaco.

TRANSFORMADORES

I - Conceito

a) Introdução

O transformador é um dispositivo eletromagnético de grande aplicação em eletrônica, que serve para transformar as características de uma fonte de energia alternada ou pulsante, modificando o valor da corrente, da tensão, ou de ambas, simultaneamente. Graças a essa propriedade, ele se presta para adaptar impedâncias.

O emprego do transformador é muito vasto. Poderíamos citar inúmeros exemplos de aplicação rotineira. Em eletrotécnica, é usado inicialmente para elevar a tensão do alternador a milhares de volts, para que a energia seja transportada pela linha de transmissão com um mínimo de perdas. Posteriormente, é utilizado para reduzir o alto valor da tensão a valores mais baixos, compatíveis com a tensão de funcionamento das máquinas elétricas e com a segurança dos usuários. Dentre as aplicações em eletrônica, podemos citar aquela em que o transformador é utilizado para modificar a tensão da linha, geralmente 110 ou 220 V, para valores diferentes, mais baixos, ou mais altos.

Mesmo quando se trate de aparelhos transistorizados, de potência que não seja adequada ao funcionamento com bateria, emprega-se o transformador com a finalidade de modificar a tensão para o valor conveniente, que será posteriormente retificada.

A ligação de um alto-falante ao coletor de um transistor não pode ser feita diretamente, porque o transistor tem impedância relativamente alta (alguns milhares de Ohms), e o alto-falante a tem sensivelmente baixa (de 3,2 a 16Ω). Então, usa-se um transformador especial, conhecido como **transformador de saída**, que faz a adaptação das impedâncias e propicia, como sabemos, a maior transferência de energia do transistor para o alto-falante.

b) Princípio de funcionamento do transformador

O transformador, como afirmamos anteriormente, é um dispositivo eletromagnético. Seu princípio de funcionamento baseia-se na transferência da energia de uma bobina para outra, através do campo eletromagnético. Quando tratamos dos princípios do eletromagnetismo, em outra lição de nosso curso, apresentamos o princípio de funcionamento do transformador, mas vamos repeti-lo aqui.

Admitamos, então, que em uma barra de material ferromagnético, sejam enrolados dois pedaços de fio, como mostramos na **figura 1**. Às extremidades do primeiro enrolamento, ligaremos uma fonte de tensão variável e, às extremidades do segundo enrolamento, ligaremos um indicador de tensão (voltímetro).

Observaremos que o voltímetro

Figura 1 - Princípio de funcionamento do transformador.

indica a presença de tensão nas extremidades do segundo enrolamento o que se explica facilmente, lembrando-se o princípio fundamental do eletromagnetismo: "Variação de fluxo induz força eletromotriz nos condutores." De fato, como a corrente elétrica, no primeiro enrolamento, é variável (vamos admitir, de agora em diante, que seja alternada), o campo magnético na barra de ferro também o será. Esse campo magnético corta as espiras do segundo enrolamento e induz nelas uma força eletromotriz, que é acusada pelo voltímetro.

Nos transformadores, chama-se de **núcleo** o material que é envolvido pelo enrolamento. Em nosso exemplo, foi uma barra de ferro, mas poderia ser, inclusive, o ar. O núcleo de ar só é usado em transformadores de radiofreqüência, como veremos posteriormente.

Costuma-se chamar de **primário** o enrolamento onde se aplica a fonte de energia alternada e, de **secundários**, os enrolamentos de onde se extrai a energia transformada. No exemplo da figura 1, **primário** é o primeiro enrolamento; o transformador de nosso exemplo possui um único **secundário**, que corresponde ao segundo enrolamento. O símbolo do transformador está indicado na **figura 2.**

Em resumo, o transformador é um dispositivo eletromagnético formado por: **núcleo, enrolamento primário** e um ou mais **enrolamentos secundários.**

O aluno deve notar, que num transformador com vários enrolamentos, qualquer um deles pode ser o primário, e os restantes, obviamente, serão os secundários.
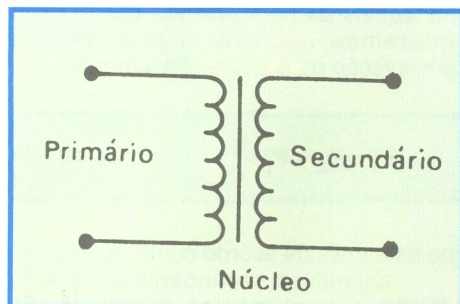
Figura 2 - Simbologia do transformador.

c) Relação de transformação

Suponhamos que o primário do transformador apresentado linhas atrás seja um enrolamento de 100 espiras (voltas), e que o secundário seja construído também com 100 espiras. Nestas circunstâncias, se aplicarmos uma tensão de 100 volts no primário, observaremos que o voltímetro indicará também 100 Volts no secundário. Se baixarmos para 50 V no primário, a tensão do secundário também baixará para 50 V. Do mesmo modo, se aumentarmos a tensão do primário para 200 V, a do secundário também se modificará para 200 V.

Em uma segunda etapa, vamos substituir o secundário por um enrolamento de 50 espiras, conservando o primário com 100. Agora, aplicando 100 V ao primário, notaremos que o voltímetro acusará somente 50 V no secundário. Diminuindo a tensão do primário para 50 V, a do secundário baixará para 25 V. Aumentando a tensão do primário para 200 V, a do secundário aumentará para 100 V.

Finalmente, numa terceira etapa, substituamos o enrolamento secundário por outro de 200 espiras. Agora, observamos que, ao aplicar 100 V no primário, aparecem 200 V no secundário; ao aplicarmos 50 V, aparecem 100 V e, ao aplicarmos 200 V, aparecem 400 V no secundário.

Com estas práticas, podemos chegar a duas conclusões básicas:

1ª) Que é possível modificar a tensão recolhida no secundário, bastando, para isso, modificar seu número de espiras. Diga-se de passagem que esta é a característica fundamental do dispositivo e por causa dela é que se lhe dá o nome de transformador.

2ª) A tensão recolhida no secundário do transformador depende da tensão que se aplica ao primário e, também, do número de espiras do secundário.

De fato, em nossa primeira experiência, o número de espiras do primário é igual ao do secundário.

Então, para qualquer tensão aplicada ao primário, teremos sempre tensão igual no secundário. Além disso, podemos observar que a relação (divisão) entre a tensão do secundário e a do primário é a mesma que a relação entre o número de espiras do secundário e do primário. Em outras palavras, dividindo a tensão do secundário pela tensão do primário, obtemos o mesmo número que obteríamos dividindo o número de espiras do secundário pelo do primário: no caso, é 1.

A relação entre a tensão do secundário e a do primário, que, como mostramos atrás, é a mesma que a relação entre o número de espiras do secundário e do primário, é chamada de **relação de transformação**.

Chamando, genericamente, de E_1 e N_1, respectivamente, a tensão e o número de espiras do primário, e de E_2 e N_2 a tensão e o número de espiras do secundário, segue-se que a **relação de transformação**, que chamaremos de **r**, será:

$$r = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \qquad (1)$$

Em nossa segunda experiência, vamos notar que, ao aplicar 100 V no primário, obtivemos 50 V no secundário; logo a relação entre tensões é de:

$$r = \frac{E_2}{E_1} = \frac{50}{100} = \frac{5}{10} = 0{,}5 \text{ (meio)}$$

Evidentemente, a relação entre o número de espiras é a mesma, pois:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{50}{100} = 0{,}5$$

Observe que, ao aplicarmos 50 V e 200 V no primário, a tensão do secundário passou para 25 e 100 V, e a relação continuou a mesma, ou seja:

$$\frac{25}{50} = 0{,}5 \text{ e } \frac{100}{200} = 0{,}5$$

Para a terceira experiência, a relação de transformação é:

$$r = \frac{200}{100} = \frac{400}{200} = \frac{100}{50} = 2$$

Tendo em conta a relação de transformação, podemos classificar o transformador em:

1) **de isolação** - quando a relação de transformação for igual a 1 (r = 1). Note o aluno que, neste caso, não há transformação de tensões, mas o secundário fica eletricamente isolado do primário; daí o nome de **transformador de isolação**. Usa-se tal transformador quando se deseja isolar da linha aparelhos que tenham um dos terminais de entrada de força ligado diretamente ao chassi. Um dos fios de força é ligado no chassi. Se esse fio coincidir com pólo "vivo" da tomada, ao encostarmos a mão em qualquer parte metálica do aparelho, levaremos choque, porque fecharemos o circuito através de nosso corpo. Se usarmos um transformador de isolação para ligar o aparelho, não correremos esse risco. Na **figura 3**, ilustramos o porquê dessa afirmação.

2) **Redutor** - quando a relação de transformação é **menor** que a unidade. Neste caso, a tensão do secundário é sempre menor que a do primário.

3) **Elevador** - quando a relação de transformação é **maior** que a unidade. Aqui, a tensão do secundário é sempre maior que a do primário.

Estas duas últimas classificações valem somente quando o transformador tem um único secundário, pois, tendo mais de um, nada impede que a tensão seja maior que a do primário, em alguns deles (elevador), e menor, em outros (redutor).

A justificação da propriedade de transformação de tensão dos transformadores poderá ser feita se lembrarmos que cada espira do primário forma um determinado número de linhas de força (campo magnético). O campo magnético total será, então, a soma das linhas de força de todas as espiras. Essas linhas cortam as espiras do secundário. Ora, se o secundário tiver o mesmo número de espiras que o primário, todas as linhas cortarão as espiras do secundário e
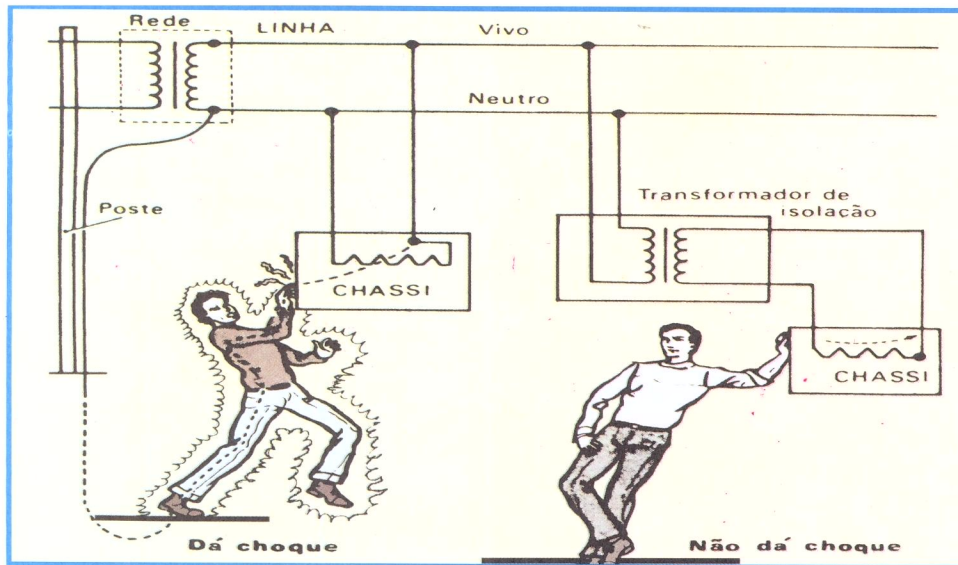
Figura 3 - O porquê da isolação.

induzirão força eletromotriz em cada espira. A soma dessas forças eletromotrizes será igual à tensão aplicada ao primário.

Se o número de espiras do secundário é igual à metade do número de espiras do primário, então metade das linhas de força do primário se perde, e o campo magnético corta um número de espiras que é só a metade do primário; portanto, induz-se somente a metade da força eletromotriz.

No caso inverso, ou seja, quando o número de espiras do secundário for o dobro do primário, as linhas de força cortarão o dobro de espiras e induzirão, também, o dobro da força eletromotriz.

d) Conservação da energia

Afirmamos que o transformador pode modificar a tensão, a corrente e, ainda, a tensão e a corrente, simultaneamente. Isso é verdadeiro, mas, em qualquer circunstância, não podemos esquecer que deve prevalecer o princípio da conservação da energia, ou seja, a energia que se recolhe no secundário é, no máximo, igual à energia que se aplica ao primário. Na realidade, a energia recolhida no secundário é sempre um pouco menor que a aplicada, em virtude das perdas que ocorrem no transformador. No caso do transformador **ideal,** isto é, sem perdas, a transformação é completa, e podemos escrever a igualdade:

$$W_1 = W_2 \qquad (2)$$

onde W_1 representa a energia **aplicada** ao primário e W_2, a **retirada** no secundário.

Dada a equivalência entre energia e potência, podemos escrever também

$$P_1 = P_2 \qquad (3)$$

onde P_1 é a potência aplicada ao primário e P_2, a retirada no secundário.

Sabemos que a potência elétrica é calculada multiplicando-se a tensão pela corrente, ou seja, P = E I; logo, para o transformador, podemos escrever:

$$E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2 \qquad (4)$$

que é a igualdade básica que leva em conta a conservação da energia.

Vamos raciocinar com números, para que não pairem dúvidas sobre o assunto. Suponhamos que aplicamos ao primário uma tensão de 100 V, e que a potência seja de 100 W. Então pela expressão conhecida, I = P ÷ V, resulta que a corrente no primário é de:

$$I_1 = P_1 \div V_1 = 100\ W \div 100\ V = 1\ A$$

No secundário, sabemos que se pode obter qualquer valor de tensão, pela escolha conveniente da relação de transformação, isto é, do número de espiras em relação ao primário. Todavia, ao impor a tensão, estamos fixando a corrente, porque a igualdade

$$W_1 = E_2 I_2 \qquad (5)$$

tem que ser mantida. Assim, no exemplo que estamos estudando, se desejamos obter tensão de 1000 V, podemos conseguí-la, mas a corrente máxima do secundário terá de ser de 0,1 A, para que a potência seja de 100W. De fato:

$$1000\ V \times 0{,}1\ A = 100\ W$$

O valor da corrente do secundário é facilmente calculado pela expressão (5). De fato, de lá temos:

$$I_2 = \frac{W_1}{E_2} = \frac{100}{1000} = 0{,}1A$$

Nos transformadores reais, a potência que podemos utilizar é sempre menor que a aplicada, porque uma parcela desta é transformada em calor, nas resistências ôhmicas do enrolamento, e outra parcela é perdida no núcleo, também sob a forma de calor. Se chamarmos de P_p a potência das perdas, poderemos escrever o princípio da conservação da energia sob a forma:

$$P_1 = P_2 + P_p \qquad (6)$$

que está mais de acordo com a realidade.

Quando o secundário é formado por vários enrolamentos, a potência P_2 corresponde à soma das potências individuais de cada enrolamento, mais a potência das perdas. Por exemplo, se o transformador tem três secundários, um de tensão E_A e corrente I_A, outro de tensão E_B e corrente I_B e outro de tensão E_c e corrente I_c, a expressão (6) da conservação da energia fica:

$$P_1 = E_A I_A + E_B I_B + E_c I_c + P_p$$

As potências individuais do secundário e também a potência do primário são calculadas multiplicando-se a tensão pela corrente, mas as perdas são estimadas em watts e dependem de uma série de fatores que citaremos mais adiante.

e) Eficiência ou rendimento

A eficiência ou rendimento de um transformador é uma grandeza que exprime a relação entre a energia aproveitada e aquela aplicada ao transformador. Quando essa relação é indicada em porcentagem, chamamo-la de **eficiência**, quando indicada por uma fração, chamamo-la de **rendimento.**

Costuma-se indicar a eficiência pela letra η (eta) e o rendimento pela letra μ (mu).

No transformador ideal, onde toda a energia aplicada ao primário é recolhida no secundário, dizemos que a eficiência é de 100% (cem por cento) ou que o rendimento é 1. Nos transformadores reais, a eficiência **sempre** é menor que 100% ou o rendimento é **sempre** menor do que 1, porque a energia retirada do

transformador **nunca** pode ser superior à energia que a ele se aplica.

A parcela de eficiência que falta para atingir os 100%, ou a do rendimento que falta para completar 1, corresponde às perdas do transformador.

Por exemplo, se a um transformador em funcionamento ligarmos dois wattímetros, um no primário e outro no secundário, poderemos medir a potência de entrada e a de saída. Fazendo a relação entre as duas, encontramos a eficiência ou o rendimento. Suponhamos que o wattímetro da entrada acuse 100 W e o da saída, 80 W.

A eficiência de tal transformador será de:

$$\eta = \frac{80}{100} \times 100\% = 80\%$$

O rendimento será:

$$\mu = \frac{80}{100} = 0{,}8$$

Isso significa que 20% da energia aplicada ao primário (20 W) é perdida no interior do transformador, através do aquecimento dos condutores, do aquecimento do núcleo, das linhas de força que se perdem etc.

Observe o aluno que a perda é relativa, pois, se a potência no primário do transformador fosse de 10 W e não 100 W, a do secundário seria de 8 W e não de 80 W, de modo que a perda, no caso, seria de 2 W, o que acarreta a mesma eficiência e o mesmo rendimento, ou seja:

$$\eta = \frac{8}{10} \times 100\% = 80\% \text{ ou } \mu = \frac{8}{10} = 0{,}8$$

f) Regulação

Dizemos que um transformador está **em vazio**, quando não é ligada nenhuma carga no secundário. Quando isso acontece, no primário circula uma corrente muito pequena, devida exclusivamente às perdas no núcleo e no enrolamento do primário. A tensão medida no secundário é chamada de **tensão em vazio.**

Ao ligarmos a carga ao secundário, a sua tensão se modifica (abaixa), e medimos, então, a tensão de **plena carga**. No caso do transformador ideal, tanto a tensão **em vazio** como a de **plena carga** são iguais. No transformador real, isso não acontece, porque a tensão de plena carga é **menor** do que a tensão em vazio, em virtude da queda que a resistência ôhmica do enrolamento provoca, devido à passagem de corrente. Certamente, o transformador será tanto melhor, ou seja, mais se aproximará do ideal, quanto mais próximos forem os valores das tensões de plena carga e em vazio. Para indicar essa qualidade do transformador, define-se um índice chamado **regulação**, dado pela variação da tensão em relação à tensão em vazio, em porcentagem, ou seja, a regulação R é igual à diferença entre a tensão em vazio e a tensão de carga, dividida pela tensão em vazio e multiplicada por 10%. Matematicamente, teremos:

$$R = \frac{E_v - E_c}{E_v} \times 100\%$$

onde E_v = tensão em vazio e E_c =tensão de plena carga.

Note que o transformador é tanto melhor quanto menor é a regulação. Por exemplo, suponhamos que um transformador tenha 200 V de tensão em vazio e que essa tensão caia para 190 V, quando é ligada a carga; a regulação desse transformador será de:

$$R = \frac{200 - 190}{200} \times 100\% = \frac{10}{200} \times 100\% = 0{,}05 \times 100\% = 5\%$$

Naturalmente, se a regulação fosse de 1%, o transformador seria melhor.

g) Força contra-eletromotriz do transformador

Linhas atrás, afirmamos que, no transformador ideal, a corrente no primário é nula, quando não há carga no secundário. Ora, o enrolamento primário, dependendo da potência do transformador, pode ter resistência ôhmica de alguns milésimos de Ohm. Sendo ligado à linha de 110 ou 220 V, pode parecer ao aluno que a corrente através do enrolamento deva ser muito grande. Na realidade, isso não acontece. Vejamos porque. Para clareza de raciocínio, vamos admitir que o primário de um transformador ideal tenha 110 espiras e seja ligado à rede de 110 V alternados. Se assim é, cada espira do enrolamento fica submetida à diferença de potencial de 1 Volt. Mas sabemos que o campo magnético variável induz, na própria espira, uma força contra-eletromotriz de mesma tensão (1 Volt) e de sinal oposto à tensão indutora. Então, no enrolamento todo, teremos uma força contra-eletromotriz de indução de 110V, de sinal contrário ao da tensão indutiva. Isto quer dizer que a força contra-eletromotriz induzida **cancela** a tensão que provoca a indução e, não havendo diferença de potencial, também não existirá circulação de corrente. Tudo se passa como se a impedância do primário tivesse **valor infinito.**

No caso do secundário ser posto em curto-circuito, a impedância do primário se anula, e ele também fica em curto. É fácil admitir essa conseqüência através da intuição. De fato, pelo que expusemos até aqui, o aluno compreendeu que toda potência retirada no secundário vem do primário. Então, ao aumento de corrente do secundário corresponde aumento proporcional no primário. Sendo assim, colocando-se o secundário em curto-circuito e admitindo que se trate do transformador ideal, a corrente passa a ser elevadíssima (teoricamente, infinita). O primário terá, também, corrente infinita e se queimará. É claro que, a tensão do primário não sendo nula, a corrente só poderá ser infinita, se a impedância se anular, pois sabemos que $I = V \div Z$.

Em resumo:

- No transformador **ideal** sem carga, a impedância do primário é infinita e a corrente é zero. No transformador **real,** sempre existirá uma pequena corrente, em razão da carga imposta ao primário pelas perdas.
- No transformador **ideal** com secundário em curto-circuito, a impedância do primário é nula e a corrente, infinita. No transformador **real**, curto-circuito absoluto (zero Ω) no secundário não é possível, devido à resistência ôhmica do fio do enrolamento; todavia, ela se torna tão baixa que vai provocar o aumento exagerado da corrente do primário, levando-o à destruição (queima).

II - Detalhes construtivos do transformador

1 - Núcleo

O núcleo dos transformadores de baixa freqüência é feito com material ferromagnético especial, constituído de aço misturado com pequena quantidade (2% a 4%) de silício. Esse material recebe o nome de **ferrossilício**.

A eficiência do transformador depende muito da qualidade do núcleo, porque ele deve permitir a passagem e a concentração das linhas de força do campo magnético, e não provocar muita perda de potência. As perdas que se

verificam no núcleo são designadas, genericamente, por **perdas no ferro**.

Os núcleos dos transformadores não são peças inteiriças; mas um empilhamento de chapas de pequena espessura, sendo as mais usadas as de números 24 e 29, que correspondem às espessuras de 0,63 mm e 0,35 mm, respectivamente.

As lâminas utilizadas em transformadores de pequena potência, como são os de aplicação em radiotécnica, são

Figura 4 -Lâminas utilizadas para formação do núcleo.

cortadas em vários formatos, recebendo as denominações que a forma sugere. Assim, teremos chapas em E, em I, em F, etc., como mostramos na **figura 4**.

Em transformador para radiotécnica, usam-se quase que exclusivamente as chapas E e I.

De acordo com o núcleo, os transformadores podem ser classificados em:

a) Tipo anel ou núcleo

Neste tipo, são usadas chapas U, mostradas na **figura 5** e I, embora se possa utilizar somente a I. Os enrolamentos envolvem o núcleo. Na **figura 6**, indicamos como se empilham as chapas. O aluno observa que, com chapas U e I, deve-se alternar a posição do I, ou seja, ele fecha o U de um lado, depois do outro, e assim por diante. Isso se faz para evitar a superposição das juntas.
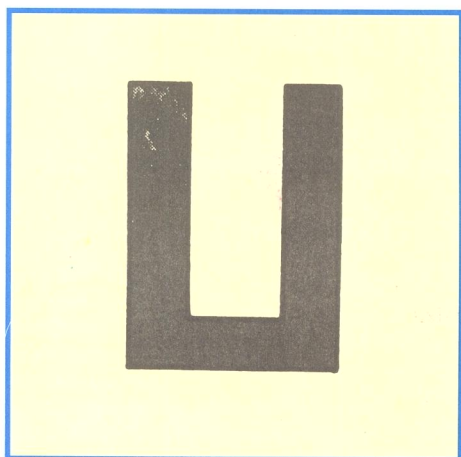
Figura 5 -Lâmina tipo U.

Na **figura 7**, vê-se a posição dos
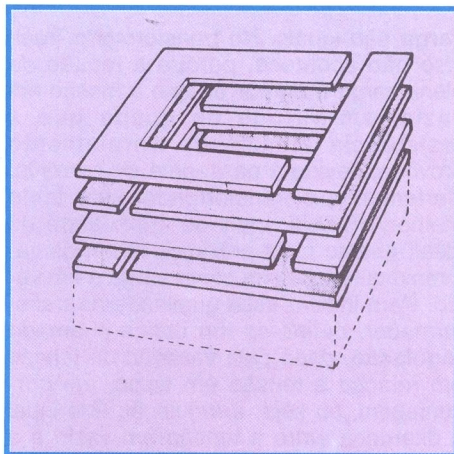
Figura 6 -Entrelaçamento das lâminas.
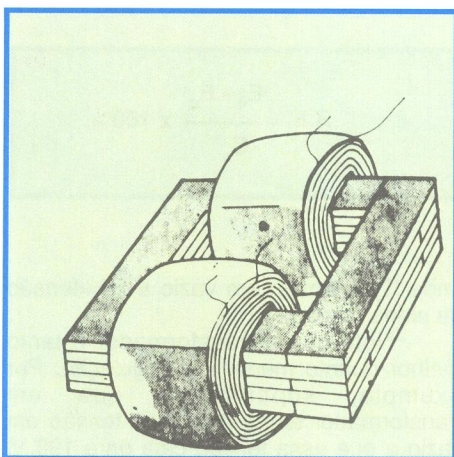
Figura 7 -Posição dos enrolamentos.

enrolamentos sobre o núcleo. Como se nota, os enrolamentos envolvem o núcleo.

b) Tipo blindado ou encouraçado

Aqui, o núcleo envolve o enrolamento. O núcleo é formado pelo empilhamento de chapas E e I; também com o I se fechará o E em lados alternados, para evitar a superposição das juntas. O transformador do tipo blindado é o que mais se usa em radiotécnica. Na
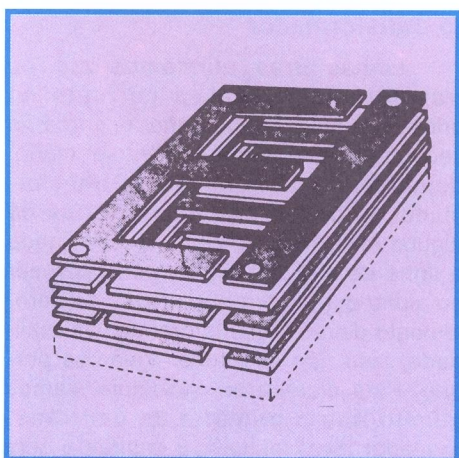
Figura 8 - Empilhamentos das chapas E e I.
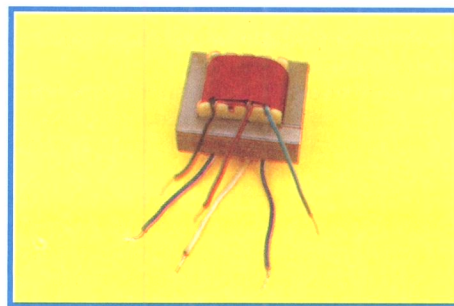
Figura 9 -Posição dos enrolamentos no núcleo.

figura 8, mostramos o empilhamento das chapas enquanto que, na **figura 9**, observa-se a posição do enrolamento.

Observações:

1ª) As chapas do tipo E e I têm dimensões na proporção que indicamos na **figura 10**.
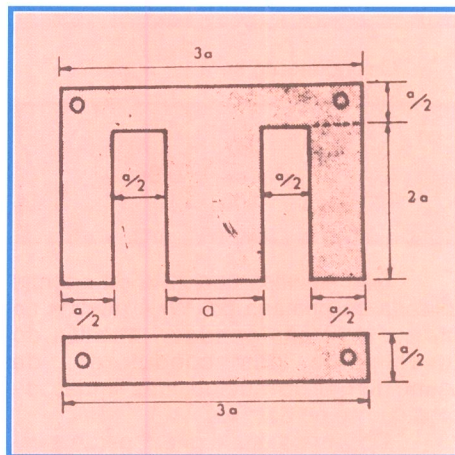
Figura 10 - Proporção das dimensões das chapas E e I.

2ª) Após o empilhamento, o enrolamento deve ser alojado em volta do núcleo. O local onde se coloca o enrolamento é chamado de **perna** do núcleo. No núcleo do tipo blindado, o enrolamento é alojado na **perna central**.

A área **S** do núcleo, que será considerada no cálculo do transformador, corresponde à secção reta (corte) da perna que aloja o enrolamento. No núcleo
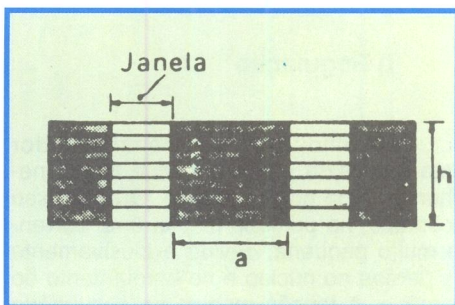
Figura 11 -Proporção das dimensões da chapa E.

blindado, chamando de **a** a largura da perna central e de **h** a altura do empilhamento (**figura 11**), resulta que a área

do núcleo é o produto de **a** por **h**, ou.

$$S = a \cdot h$$

3ª) Para evitar que as chapas do núcleo entrem em contato elétrico entre si (curto-circuito), quando empilhadas, devem-se isolar suas faces. Isso antigamente se fazia, colocando-se em cada uma delas uma folha de papel isolante (papel do tipo manteiga). Atualmente, as chapas sofrem um processo de oxidação, logo após a laminação, o que isola suas faces.

4ª) O espaço livre do núcleo E I, que será ocupado pelo enrolamento, é chamado de **janela**. No núcleo representado na **figura 12**, é fácil observar que a janela tem profundidade 2a e abertura a/2.
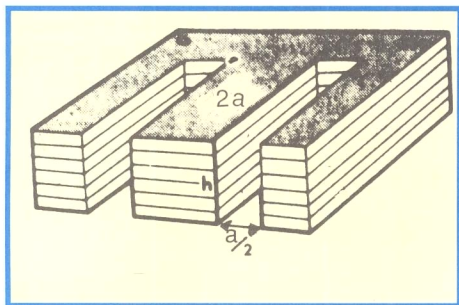
Figura 12 -Proporção das dimensões das janelas.

2 - Perdas no núcleo

Afirmamos que, no transformador real, sempre existe uma parcela de potência não aproveitável, devido a dois fatores: à resistência ôhmica dos condutores e ao núcleo.

As perdas no núcleo são de duas espécies:

a) Perda de Foulcaut

Admita o aluno que o núcleo seja uma peça inteiriça, de ferro, envolvida pelo enrolamento. Quando o primário é ligado à fonte alternada, o fluxo magnético variável gera corrente no núcleo, pois ele se comporta como uma espira em curto-circuito. Essa corrente, que é denominada de corrente parasita ou de Foulcaut (lê-se fulcô), circulando pelo núcleo, provoca seu aquecimento.

Exatamente para diminuir a corrente parasítica é que faz o núcleo de lâminas isoladas entre si, porque isso aumenta sua resistência ôhmica e, conseqüentemente, diminui a corrente parasita.

b) Perda por histerese

Sabemos que, para imantar um núcleo, há necessidade de efetuar um trabalho elétrico. Esse trabalho não é totalmente transformado em indução, mas uma parte dele é perdida no próprio núcleo. Essa perda é chamada de **histerética** ou perda por **histerese**, porque ela está ligada ao ciclo de histerese do material ferromagnético. Em linhas gerais, a histerese consiste no atraso, ou seja, na defasagem entre o campo magnético e a indução, quando o campo é variável. Ao aplicarmos a corrente alternada ao primário, estaremos criando um campo magnético também variável. Quando a corrente passar de seu valor zero ao valor máximo, o campo sofrerá a mesma variação, e a indução magnética também. Quando a corrente passa do máximo ao zero, o campo acompanha essa variação, mas a indução não, ou seja, quando o campo atinge o valor zero, a indução tem ainda um valor que se chama **residual** ou **remanescente**. Para anular a indução, é preciso aumentar o campo em sentido contrário. Há, portanto, o **atraso** da indução. Isto significa, em palavras simples, que, para desimantar o ferro, temos que aplicar energia maior do que a que foi gasta na imantação; portanto, o ferro provoca perdas.

A perda por histerese depende do tipo do material com que é feito o núcleo, da indução e da freqüência. Ela aumenta, quando se aumenta a indução e/ou a freqüência.

Observações:

1ª) As perdas em um transformador podem ser calculadas com bastante precisão, através de fórmulas adequadas ou de tabelas; todavia, para os transformadores de pequena potência, costuma-se estimá-las entre 20 a 5%, o valor mais baixo dependendo da qualidade do ferro, da espessura da chapa, da freqüência e do capricho na construção do transformador.

2ª) A indução do núcleo é indicada em gauss, ou seja, no número de linhas de força por centímetro quadrado. O ferrossilício comercial é fabricado, em linhas gerais, para três valores de indução: 8 000 linhas x cm^2, 10 000 linhas x cm^2 e 15 000 linhas por cm^2. Dá-se preferência ao de 10 000 gauss, por ser um meio-termo entre os outros dois.

3 - Fios

Os enrolamentos das bobinas dos transformadores são executados em camadas, isoladas entre si. Os condutores mais utilizados para o enrolamento são os fios esmaltados e os isolados com uma ou duas capas de seda ou algodão, sendo estes últimos raramente utilizados. O diâmetro do fio é escolhido de acordo com a potência do enrolamento.

a) Perda no cobre

A perda de potência introduzida no transformador pela liberação de calor, através da resistência ôhmica do fio, é chamada de **perda no cobre**. Essa perda soma-se à perda no ferro e contribui ainda mais para aquecer o núcleo.

Para miniaturizar a perda no cobre, seria necessário o emprego de condutor de baixa resistência, ou seja, de grande área. Como isso não é econômico e nem sempre é realizável, praticamente, já que todo enrolamento deve ser alojado na janela do núcleo, impõe-se uma taxa de trabalho, ou seja, uma densidade de corrente. Por densidade de corrente entende-se a quantidade de corrente em Ampères, que pode passar pela secção do fio, em milímetros quadrados.

A densidade de trabalho é escolhida entre 1 a 2 A/mm^2. Emprega-se 1 A/mm^2 em transformadores mau ventilados e de uso permanente e 2A/mm^2 em transformadores de uso descontínuo, isto é, que não ficam ligados as 24 horas do dia e que tenham condições boas de ventilação. De um modo geral, a densidade 1,5 A/mm^2 constitui um meio-termo entre os dois extremos e pode ser adotada em todos os transformadores de pequena potência, como são os de uso geral em radiotécnica.

Na tabela que segue com esta lição especial o aluno encontrará os dados mais interessantes dos fios, para uso em enrolamento de transformadores. Nela, o aluno encontrará o diâmetro do fio, o número de espiras por centímetro linear, o número de espiras por centímetro quadrado, o peso por km, a resistência por km e a corrente máxima. Note que a corrente máxima não é a que deve ser considerada no enrolamento do transformador, mas um valor mais baixo, para evitar o aquecimento excessivo. O exemplo que daremos nesta lição especial esclarecerá o assunto.

4- Isolação

Para o funcionamento perfeito e seguro dos transformadores, seu enrolamento deve ser isolado do núcleo, e as camadas isoladas entre si.

A isolação entre o enrolamento e o núcleo, nos transformadores de pequena potência de que estamos tratando, consegue-se facilmente pelo uso de um carretel de material isolante de, no mínimo, 1 mm de espessura. Esse carretel pode ser de papelão especial ou plástico. O papelão mais usado é o "prespan" devido ao seu custo reduzido e à sua boa capacidade de isolação. Quando a espessura do papel "prespan" é insuficiente, dão-se tantas voltas de papel
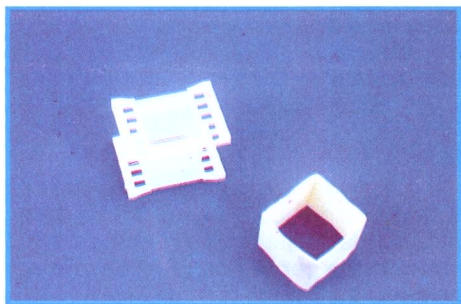
Figura 13 -Dois tipos de carretéis - papel e plástico.

quantas sejam necessárias para se conseguir a espessura desejada.

A isolação entre camadas pode ser feita também com papel "prespan" embora se usem o papel ou pano envernizado, fibra, cartão bristol, etc.

Na **figura 13**, mostramos dois
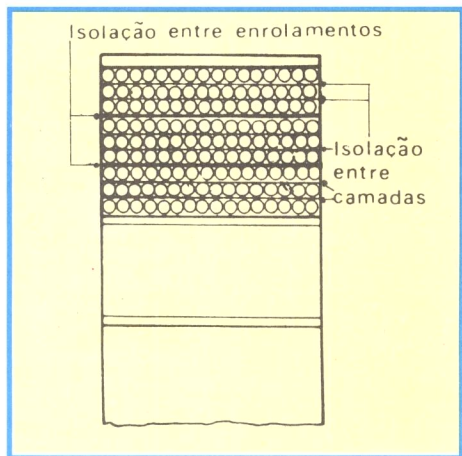
Figura 14 - Enrolamento de várias camadas e secundários em corte.

carretéis, um de cartão e outro de plástico, prontos para receberem os enrolamentos. Na **figura 14**, ilustramos o corte de um enrolamento de várias camadas e vários secundários. O aluno deve observar que a isolação entre enrolamentos é mais espessa que entre camadas.

Os transformadores de força, usados em aparelhos eletrônicos possuem vários secundários, que são enrolados uns sobre os outros e, posteriormente, encaixados na perna central do núcleo E I.

A distribuição dos vários enrolamentos faz-se na seguinte ordem:

1º - Enrola-se o primário no carretel, de modo que ele fique mais próximo do núcleo, isolando-se suas camadas com papel de 0,1 mm de espessura.

2º - Isola-se a última camada do primário com papel 0,2 ou 0,3 mm, dando-se 2 ou 3 voltas do papel de 0,1 mm; cola-se o papel e, sobre ele, enrola-se o secundário de maior tensão, também isolando-se camada por camada.

3º - Terminando o enrolamento do secundário, efetua-se a isolação final com 2 ou 3 voltas de papel de 0,1 mm, e passa-se ao enrolamento seguinte.

4º - Prossegue-se o enrolamento dos secundários, obedecendo a ordem decrescente das tensões, exatamente como fizemos para os anteriores.

5º - Terminado o último enrolamento, recomenda-se impregnar a bobina com um banho de verniz isolante ou parafina neutra.

5 - Código de cores para os fios

Após o término do último enrolamento, as extremidades dos condutores podem ser soldadas, depois de convenientemente limpas, aos
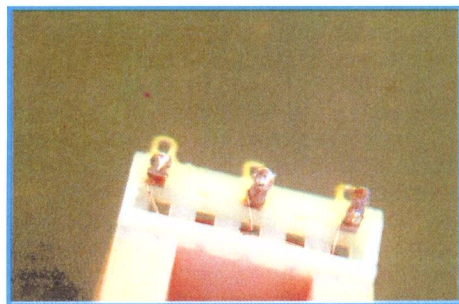
Figura 15 - Soldagem dos fios do enrolamento aos terminais do carretel.
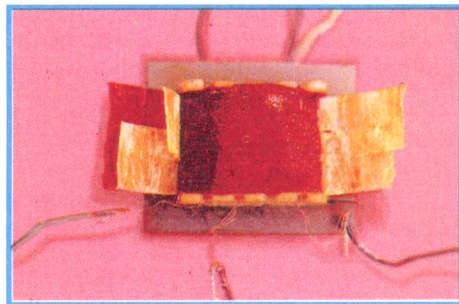
Figura 16 - Fixação do "cabinho" aos fios do enrolamento de um transformador.

terminais do carretel, como mostramos na **figura 15**. Se, em vez de terminais, forem usados cabinhos para as ligações, eles deverão ser soldados aos fios do transformador, no começo e no fim do enrolamento, de modo que o papel isolante o comprima ao mesmo tempo que o isole, isto para evitar que um esforço mecânico (puxão) quebre o fio do enrolamento. É conveniente, ainda, colar o cabinho no papel isolante, usando-se cola rápida, como Duco ou equivalente. Na **figura 16**, mostramos um detalhe da "amarração" do cabinho.

No caso do uso de cabinho, geralmente observa-se o seguinte código de cores para as ligações externas dos transformadores de força:

- **Primário** - Se o primário tiver derivações, usar-se-á o preto, para o início do enrolamento, e cores diferentes, para as demais ligações. Se há uma só derivação, as cores são: preta, amarela e vermelha.

- **Secundário de alta tensão** - Usa-se, normalmente, fio vermelho para as extremidades e amarelo para a derivação, se houver.

Na **figura 17**, mostramos o esquema simbólico de um transformador de força com um enrolamento secundário, indicando um possível código de cores.

6 - Dimensões do enrolamento

É claro que o enrolamento tem que ser alojado na janela do núcleo; logo, devemos subordinar suas dimensões às da janela.

Para maior facilidade e, também, por ser o núcleo blindado o de maior uso, vamos determinar o espaço útil da janela desse núcleo.

Feito o carretel para o enrolamento, com espessura de 1 mm e do comprimento da perna central (2a), devemos enrolar sobre ele todos os enrolamentos. Para que as camadas não
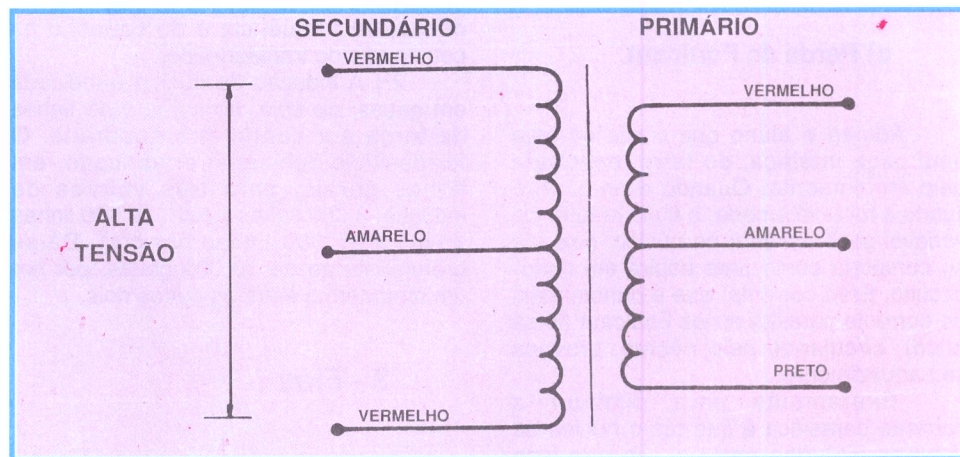
Figura 17 - Esquema simbólico de um transformador.

toquem as chapas do núcleo, devemos deixar, no mínimo, 1 mm de cada lado do carretel ao enrolar as camadas. Como o carretel tem comprimento 2a, a camada terá:

$$2a - 2\ mm$$

Como a largura da janela é de a/2 e o carretel ocupa 1 mm, passaremos a ter o espaço útil de:

$$\frac{a}{2} - 1\ mm$$

Temos, então, as dimensões úteis da janela, ou seja, do espaço que alojará os enrolamentos.

Agora, calculamos a altura das camadas e comparamo-la com a dimensão $\frac{a}{2} - 1$. Se for menor ou igual, caberá na janela; se for maior, não caberá e teremos de dar outra solução.

A altura de cada enrolamento é igual à altura das camadas, mais a altura dos isolantes do início e do fim da camada, e mais ainda a altura dos isolantes entre camadas.

Se chamarmos de **h** a altura do enrolamento em milímetros, de **c** o número de camadas, de **d** o diâmetro do fio em milímetros, de **e** a espessura do papel isolante e de **t** a espessura do isolante entre camadas, resultará:

$$h = c\,d + t + e\,(c - 1)$$

A validade dessa expressão o aluno pode comprovar, observando a **figura 18**, onde representamos o corte de um enrolamento de 9 camadas.

É fácil observar que, entre as 9
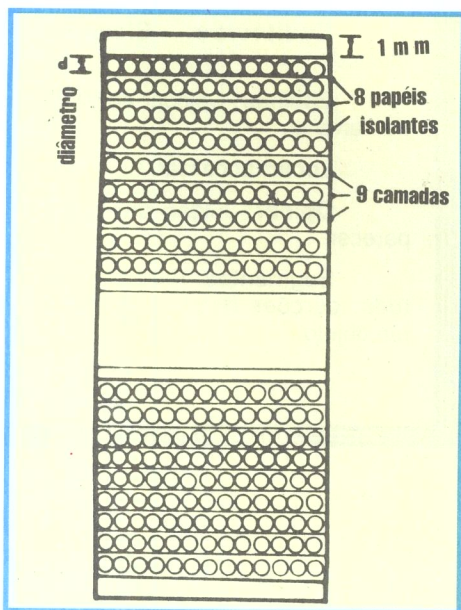
Figura 18 - Vista em corte de um enrolamento de nove camadas.

camadas, temos 8 isolantes; portanto, a espessura dos papéis será e x 8 ou e (c - 1) = e (9 - 1) = e x 8. Temos 9 diâmetros de condutores; logo, a espessura do fio será de 9 x d ou c x d, onde c = 9. Além disso, devemos somar a espessura t do isolante da última camada. Note que não há necessidade de somar a espessura do primeiro, porque ele já foi considerado no carretel.

Após efetuar todas as somas indicadas, é conveniente acrescentar + 10% do total, para compensar as imperfeições do enrolamento.

No exemplo de cálculo que daremos em seguida, o aluno entenderá melhor a questão.

III - Exemplo de cálculo de um transformador de força

O cálculo de qualquer transformador de força de pequena potência é relativamente fácil e pode ser feito pelo técnico comum. O enrolamento do transformador é executado em bobinadeiras, manuais ou elétricas, podendo, em caso de extrema necessidade, adaptar-se uma furadeira manual para bobinadeira, como sugerimos na **figura 19.**
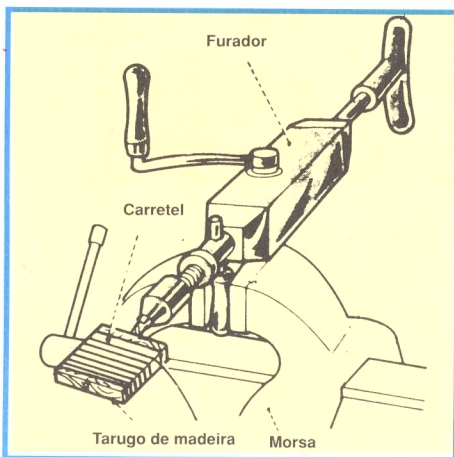
Figura 19 - Uso de uma furadeira manual como bobinadeira.

Nas linhas que se seguem, faremos o projeto de um transformador de força, o exemplo é geral e servirá de modelo para o aluno executar o projeto de qualquer outro tipo de transformador.

O método geral para o cálculo do transformador de alimentação (força) é o seguinte:

1º) Calcula-se a potência total de todos os secundários. Para isso, multiplica-se a tensão de cada um por sua corrente, e somam-se todas as potências obtidas.

2º) Determina-se a potência do primário, dividindo-se a potência do secundário pelo rendimento. O rendimento, para os transformadores construídos manualmente, pode ser arbitrado em 0,8.

3º) Calcula-se a secção do núcleo pela fórmula $S = 1\,.\,2\sqrt{P_1}$, sendo P_1 a potência do primário.

4º) Determina-se o número de espiras do primário pela fórmula:

$$N_1 = \frac{V_1 \times 10^8}{4{,}44\ BSf} \quad (1)$$

onde V_1 é a tensão do primário, **B** é o fluxo em linhas por centímetro quadrado, **S** é a área do núcleo e **f** é a freqüência Hertz; o valor de B, que se adota normalmente, é 10 000 linhas por centímetro quadrado. Como a freqüência padronizada no Brasil é de 60 Hz, podemos simplificar a fórmula acima, substituindo os valores de B e f. Teremos:

$$N_1 = 37{,}5\ \frac{V_1}{S}$$

Observação: Caso a freqüência não seja 60 Hz e o ferro usado tenha indução diferente de 10 000 gauss, o aluno deve utilizar a fórmula geral (1).

5º) Conhecendo-se o número de espiras do primário, e como:

$$r = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

temos:

$$r = \frac{N1}{E1}$$

relação esta que se chama de relação **espira por Volt**, ou também relação volta-volt. Calculando-se essa relação, basta multiplicá-la pelo valor da tensão de cada secundário, para se ter o número de espiras.

6º) Escolhe-se o fio de cada enrolamento pela tabela I, admitindo-se uma densidade de corrente de 1 A/mm² a 2 A/mm². Como já afirmamos atrás, é conveniente adotar-se a de 1,5 A/mm².

7º) Verifica-se se os enrolamentos cabem na janela do núcleo. Caso haja folga, pode-se aumentar a isolação entre camadas e completar a folga, na última. Se o enrolamento não couber na janela, escolhe-se um núcleo de chapas maiores.
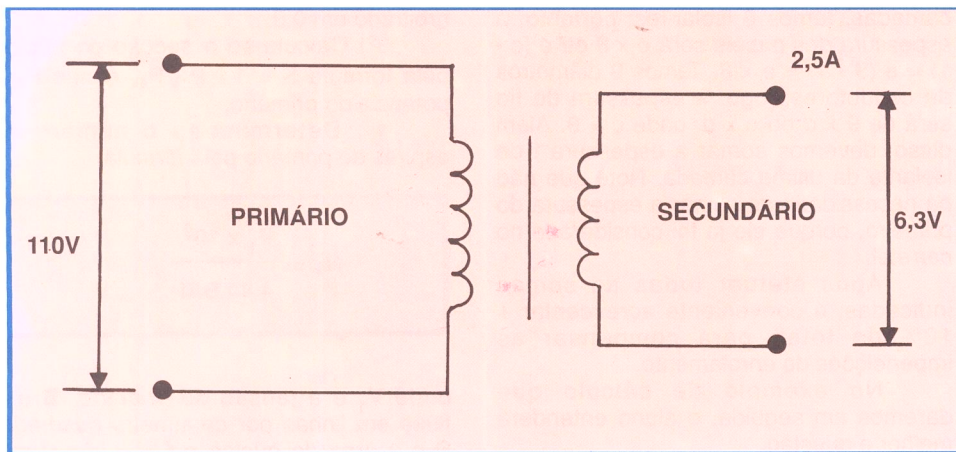
Figura 20 -Esquema de um transformador para base de cálculos.

Observação: O método de cálculo que estamos apresentando é simplificado; por isso, partimos de chapas comerciais cortadas em tamanhos padronizados e empilhamo-las, para que dêem a secção de que necessitamos, verificando se o enrolamento cabe na janela, posteriormente.

Exemplo:

Vamos projetar um transformador de alimentação com um secundário de 6,3 V - 2,5A.

O esquema é o da **figura 20.**

Marcha do cálculo

1 - Potência do secundário

Como o enrolamento é de 6,3 V sob corrente de 2,5 A, temos a potência de:

$$P_s = 6,3 \times 2,5 = 15,75 \cong 16 \text{ W}$$

Que será considerada como sendo a potência total do secundário.

2 - Potência do primário

Admitindo-se rendimento de 0,8, a potência do primário será:

$$P_1 = \frac{P_s}{0,8} = \frac{16}{0,8} = 20 \text{ W}$$

3 - Área da perna central do núcleo

A área da perna central do núcleo será:

$$S = 1,2\sqrt{P_1} = 1,2\sqrt{20} \cong 5,36 \text{ cm}^2$$

Encontramos, no mercado, chapas em E que têm 3 cm de perna central e espessura de 0,35 mm.

Como S = a h e a = 3 cm, resulta que h = S ÷ a = 5,36 ÷ 3 = 1,78 cm. Como a chapa tem 0,35 mm, necessitaremos de:

$$\frac{1,78 \text{ cm}}{0,35 \text{ mm}} = \frac{17,8 \text{ mm}}{0,35 \text{ mm}} \cong 51 \text{ chapas}$$

empilhadas, para perfazer 1,78 cm.

4 - Número de espiras do primário

Considerando B = 10 000 gauss, f = 60 Hz e tensão no primário de 110 V, teremos:

$$N_1 = 37,5 \times \frac{V_1}{S} = 37,5 \times \frac{110}{5,36} \cong 770 \text{ espiras}$$

5 - Relação espiras por Volt

É a seguinte:

$$r = \frac{770}{110} = 7$$

Logo, o número de espiras do secundário, para 6,3 V será:

$$N_2 = 6,3 \times 7 = 44,1$$

Tomaremos 44 espiras, já que o seu número deve ser inteiro.

No próximo fascículo continuaremos com o tópico aqui abordado.

VOCABULÁRIO

Adequada: Apropriada; amoldada.

Associado: Agregado; unido; aliado.

Atribuir: Conferir; conceder.

Distinta: Diferente; separada; que não se confunde.

Enaltecido: Elevado; exaltado.

Encimar: Colocar em cima de; rematar.

Locar: Localizar.

Opinar: Julgar; dar o seu parecer.

Segmentos: Partes de um todo; porções determinadas de um objeto.